



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VÍCEVRSTVÁ TEXTILNÍ ANTÉNNÍ ŘADA

MULTILAYER TEXTILE ANTENNA ARRAY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Hermány

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Roman Hermány

ID: 164841

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Vícevrstvá textilní anténní řada

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Diskutujte možné využití principů, na kterých jsou založeny vícevrstvé anténní řady, pro návrh antén integrovaných do textilních substrátů. Soustřeďte se na jednorozměrné flíčkové řady pro ISM pásmo 5,8 GHz. Při návrhu předpokládejte využití antén při bezdrátové komunikaci uvnitř automobilu. Diskusi podložte výsledky počítačových simulací.

Vyberte perspektivní koncept anténní řady a optimalizujte jej pro výrobu z trojrozměrné pleteniny SINTEX, vodivé nití a pro sitotiskový tisk. Vyrobenou anténu integrujte do čalounění střechy automobilu a do textilního potahu sedadla. Experimentálně určete optimální vzájemnou pozici antén a ověřte vzájemný přenos při prázdném a plně obsazeném automobilu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] LÁČÍK, J., MIKULÁŠEK, T., PUSKELY, J., RAID, Z., WOLANSKÝ, D. Compact arrays fed by substrate integrated waveguides, IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, 2014, p. 448 - 451, DOI: 10.1109/APWC.2014.6905566

[2] GARG, R., BHARTIA, P., BAHL, I., ITTIPIBOON, A. Microstrip Antenna Design Handbook. Norwood: Artech House, 2001, ISBN: 978-0890065136

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 17.5.2018

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem tří možných způsobů napájení sériové flíčkové řady a následnou optimalizací vybrané z nich. Anténní řada je koncipována jako vícevrstvá struktura vytvořená na 3D textilním substrátu. Cílem práce je nalézt nejlepší možnou konfiguraci anténní řady pro použití v automobilovém a leteckém průmyslu. První koncept – řada buzená blízkým mikropáskem – se ukázal v případě více sériových elementů jako nefunkční. Druhý koncept – řada buzená aperturami – je nevhodný pro použití v těsné blízkosti elektricky vodivého pláště letadla. Třetí koncept – řada buzená vlnovodem integrovaným do textilu – se jeví jako nejlepší možné řešení. Z tohoto důvodu byla optimalizována s ohledem na výrobní proces. Simulovaná impedanční šířka pásma takto navržené tříprvkové antény je 890 MHz, zisk ve směru hlavního laloku je 11,8 dBi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikropáskové vedení, vlnovod integrovaný do textilu, flíčková anténa, šterbina.

ABSTRACT

Thesis focuses on the design and development of three possible methods to power the serial patch array and optimization of the chosen design. The antenna array is conceived as a multi-layered structure formed on a 3D textile substrate. The objective of this work is to identify the best possible configuration of antenna array for the use in automotive and aerospace industry. The first concept – array coupled by near microstrip line – proved in the case of the more serial elements as non-functional. The second concept – aperture coupled array – is unsuitable for use in close proximity to the electrically conductive shell of the aircraft. The third concept – array coupled with textile integrated waveguide – seems like the best possible solution. The design of the array coupled with textile integrated waveguide was optimized in consideration of the production process. The impedance bandwidth of this proposed three elements antenna is 890 MHz, the gain in the main lobe direction is 11.8 dBi.

KEYWORDS

Microstrip line, textile integrated waveguide, patch antenna, slot.

HERMÁNY, R. *Vícevrstvá textilní anténní řada*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2018. 43 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Vícevrstvá textilní anténní řada jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu semestrální práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

Tato publikace vznikla za podpory grantu FV10087 Ministerstva průmyslu a obchodu a za podpory Interní grantové agentury Vysokého učení technického v Brně projekt č. FEKT-S-17-4713.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Řada buzená blízkým mikropáskem	2
1.1 Popis struktury	2
1.2 Postup návrhu	2
1.3 Jeden element.....	3
1.4 Více elementů	6
2 Řada buzená štěrbinou v zemní rovině mikropásku	7
2.1 Popis struktury	7
2.2 Postup návrhu	7
2.3 Jeden element.....	8
2.4 Tři elementy	11
3 Řada buzená štěrbinou ve vlnovodu integrovaném do textilu	15
3.1 Popis struktury	15
3.2 Postup návrhu	15
3.3 Optimalizace jednoho elementu.....	16
3.4 Jeden element.....	17
3.5 Tři elementy	20
3.6 Jeden element s kruhovou polarizací	23
4 Optimalizace	29
4.1 Optimalizace s ohledem na proces výroby	29
4.2 Přejchod na koaxiální konektor	31
4.3 Optimalizovaná řada	34
5 Závěr	40
Literatura	41
Seznam symbolů, veličin a zkratek	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Struktura flíčku buzeného blízkým mikropáskem.	2
Obrázek 2	Rozměry výsledné struktury s jedním elementem.	4
Obrázek 3	Činitel odrazu na vstupu antény pro vypočtený a optimalizovaný flíček.	5
Obrázek 4	Normalizovaná směrovost optimalizovaného flíčku pro rovinu E.....	5
Obrázek 5	Normalizovaná směrovost optimalizovaného flíčku pro rovinu H.	6
Obrázek 6	Struktura šterbinou buzeného flíčku s mikropáskovým napájením.	7
Obrázek 7	Struktura šterbinou napájeného flíčku z horní strany.....	8
Obrázek 8	Struktura šterbinou napájeného flíčku ze spodní strany.....	9
Obrázek 9	Činitel odrazu na vstupu mikropáskem napájené antény.	10
Obrázek 10	Simulovaný normovaný činitel směrovosti v rovině E.	10
Obrázek 11	Simulovaný normovaný činitel směrovosti v rovině H.....	11
Obrázek 12	Zakótované rozměry šterbinou buzených tří flíčků z vrchní strany.....	12
Obrázek 13	Zakótované rozměry šterbinou buzených tří flíčků ze spodní strany.....	12
Obrázek 14	Činitel odrazu na vstupu mikropásku napájejícího tři elementy.	13
Obrázek 15	Normovaná směrovost tříprvkové antény v rovině E.....	14
Obrázek 16	Normovaná směrovost tříprvkové antény v rovině H.	14
Obrázek 17	Model struktury flíčku buzeného šterbinou v TIW vlnovodu.....	15
Obrázek 18	Struktura pro návrh řady elementů pomocí Elliotovi procedury.....	17
Obrázek 19	Rozměry výsledné struktury pro jeden zářící element.	18
Obrázek 20	Činitel odrazu na vstupu vlnovodu TIW s jedním elementem.....	19
Obrázek 21	Vyzařovací diagram v rovině E pro TIW s jedním elementem.....	19
Obrázek 22	Vyzařovací diagram v rovině H pro TIW s jedním elementem.	20
Obrázek 23	Rozměry výsledné struktury pro tři zářící elementy.	21
Obrázek 24	Činitel odrazu na vstupu TIW se třemi elementy.....	22
Obrázek 25	Normovaný vyzařovací diagram v rovině E pro TIW se třemi elementy. ..	22
Obrázek 26	Normovaný vyzařovací diagram v rovině H pro TIW se třemi elementy...	23
Obrázek 27	Model TIW s kruhově polarizovaným flíčkem.	24
Obrázek 28	Zakótované rozměry kruhově polarizovaného flíčku nad TIW.	24
Obrázek 29	Rozložení elektrického pole na flíčku (fáze 0°).	25
Obrázek 30	Rozložení elektrického pole na flíčku (fáze 90°).	26

Obrázek 31 Činitel odrazu na vstupu antény pro jeden element s kruhovou polarizací.	26
Obrázek 32 Osový poměr pro jeden element s kruhovou polarizací.	27
Obrázek 33 Činitel směrovosti v rovině E pro jeden element s kruhovou polarizací. ...	27
Obrázek 34 Činitel směrovosti v rovině H pro jeden element s kruhovou polarizací. ...	28
Obrázek 35 Model vlnovodu TIW s fóliemi.	29
Obrázek 36 Rozložení elektrického pole uvnitř vlnovodu s fóliemi.	30
Obrázek 37 Model vlnovodu TIW s prokvy.	30
Obrázek 38 Rozložení elektrického pole uvnitř TIW s prokvy.	31
Obrázek 39 Model samostatného mikropásku.	31
Obrázek 40 Rozložení elektrického pole uvnitř textilu s mikropáskem na povrchu.	32
Obrázek 41 Model přechodu TIW mikropásek.	32
Obrázek 42 Činitel odrazu na vstupu přechodu TIW mikropásek.	33
Obrázek 43 Činitel přenosu přechodu TIW mikropásek.	33
Obrázek 44 Rozložení elektrického pole v textilu na přechodu TIW mikropásek.	34
Obrázek 45 Model optimalizované anténní řady.	35
Obrázek 46 Zakótovaná vrchní vrstva optimalizované řady.	35
Obrázek 47 Zakótovaná prostřední strana optimalizované řady.	36
Obrázek 48 Rozložení elektrického pole uvnitř vlnovodu TIW.	37
Obrázek 49 Rozložení elektrického pole těsně pod flíčky.	37
Obrázek 50 Činitel odrazu na vstupu anténní řady.	38
Obrázek 51 Vyzařovací diagram optimalizované řady v rovině E.	38
Obrázek 52 Vyzařovací diagram optimalizované řady v rovině H.	39

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rozměry výsledné struktury s jedním elementem.....	4
Tabulka 2 Rozměry flíčku buzeného štěrbinou nad mikropáskem.....	9
Tabulka 3 Rozměry řady tří flíčků buzených štěrbinami nad mikropáskem.....	12
Tabulka 4 Rozměry jednoho elementu na vlnovodu TIW.....	18
Tabulka 5 Rozměry tříprvkové řady na vlnovodu TIW.	21
Tabulka 6 Velikosti rozměrů kruhově polarizovaného flíčku nad TIW.....	25
Tabulka 7 Rozměry optimalizované řady.....	36

ÚVOD

Předložená diplomová práce vznikla jako součást řešení projektu Ministerstva průmyslu a obchodu FV 10087 Inteligentní čalounění pro dopravní prostředky. Cílem tohoto projektu je integrovat do textilních materiálů v interiéru letadel a automobilů elektronické subsystémy.

Mým úkolem bylo zaměřit se na využití vícevrstvých textilních struktur pro realizaci mikrovlnných antén. Základními textilními materiály jsou trojrozměrné (3D) pleteniny vyráběné firmou SINTEX. V současnosti tyto pleteniny slouží k tlumení mechanických vibrací a k teplotní izolaci. Tyto textilní materiály se používají v sedadlech a ve vnitřním obložení stěn letadel a automobilů.

Ve své práci se snažím do 3D pleteniny integrovat mikrovlnný přenosový kanál. Díky tomuto kanálu pak lze integrovat do sedadel a polstrování různé typy senzorů, a následně zajistit jejich komunikaci s řídicími systémy.

Základní 3D pleteninu ve své práci považuji za dielektrický substrát. Pletenina je totiž tvořena dvěma paralelními pevnými povrchy, jejichž konstantní vzdálenosti je dosaženo kolmými polyesterovými vlákny. Většinu objemu pleteniny tak tvoří vzduch, což zajišťuje nízké ztráty materiálu. Materiál lze tedy s výhodou použít pro realizaci planárních vedení a vlnovodů integrovaný do textilu (TIW, *textile integrated waveguide*).

Kovové plochy na povrchu textilního substrátu jsou pak realizovány stříbrnou polymerovou pastou nanášenou sítotiskem. Boční stěny TIW vlnovodu jsou vyšívány vodivými nitěmi. Při použití více vrstev textilu se jednotlivé vrstvy spojují laminací.

V předložené diplomové práci se zaměřuji na návrh flíčkové anténní řady jako na rozhraní mezi kanálem integrovaným do textilu a bezdrátovým kanálem v dopravním prostředku. Prostřednictvím numerických simulací v CST Microwave Studio studuji tři koncepty anténní řady:

- Řada buzená blízkým mikropáskem je popsána v kapitole 1. Tato řada se bohužel ukázala v případě více sériových elementů jako nefunkční.
- Řada buzená aperturami v zemní desce mezi flíčky a mikropáskovým vedením je popsána v kapitole 2. Taková řada je však bohužel nevhodná pro použití v těsné blízkosti elektricky vodivého pláště letadla, jež mikropáskové vedení silně ovlivňuje.
- Řada buzená aperturami ve vlnovodu integrovaným do textilu je popsána v kapitole 3. Tato řada se jeví jako nejlepší možné řešení. S uvážením vícenásobných odrazů uvnitř letadla je prozkoumána možnost použití tohoto konceptu s kruhovou polarizací. Výsledkem je jeden element na TIW s kruhovou polarizací.

Ve čtvrté kapitole je vybraná anténní řada optimalizována s ohledem na výrobní proces a pro možnost následného měření.

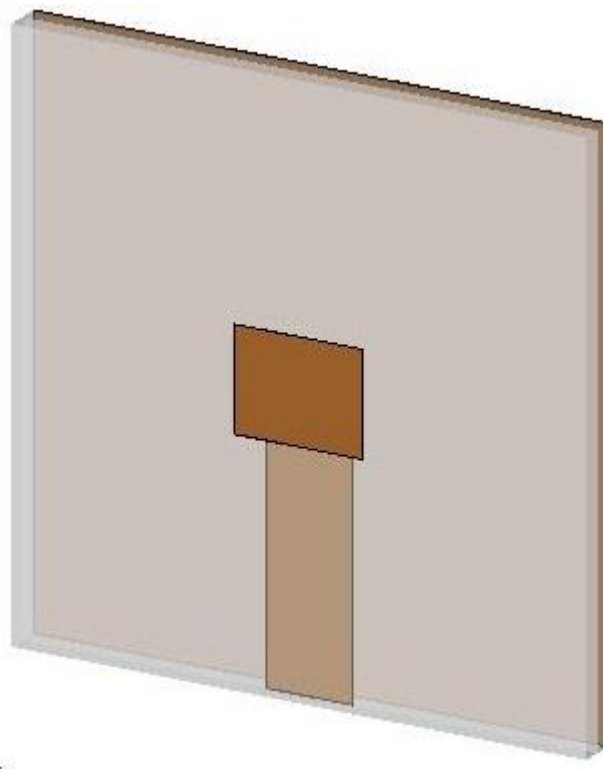
Pátou kapitolou je shrnutí a závěr.

1 ŘADA BUZENÁ BLÍZKÝM MIKROPÁSKEM

Ze studovaných způsobů napájení jsme v tomto případě dosáhli největší možné šířky pásma. Anténní řada vyniká poměrně jednoduchou výrobou.

1.1 Popis struktury

Mikropáskové vedení s charakteristickou impedancí $50\ \Omega$ umístěné na 3D textilním substrátu slouží jako napájecí síť pro flíček (viz obrázek 1). Flíčkový anténní prvek je umístěn na další vrstvě textilu nad otevřeným koncem vedení.



Obrázek 1 Struktura flíčku buzeného blízkým mikropáskem.

1.2 Postup návrhu

Prvním krokem při návrhu je vytvoření $50\ \Omega$ vedení pro jednoduché spojení struktury s napájecími rozvody. Šířka mikropásku byla vypočtena podle vestavěného makra v programu CST Microwave Studio. Pro výšku substrátu $h = 3,4\ \text{mm}$ a relativní permitivitu $\epsilon_r = 1,2$ je její velikost $W_{ms} = 15,125\ \text{mm}$.

Parametry anténního prvku na frekvenci $5,8\ \text{GHz}$ a 3D textilním substrátu

s relativní permitivitou $\varepsilon_r = 1,2$ a tloušťkou $h = 3,4$ mm můžou být vypočteny dle [1]:

$$W_p = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W_p} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

kde W_p je šířka fličky, c je rychlost světla, f_r je rezonanční frekvence, ε_r je relativní permitivita, $\varepsilon_{\text{reff}}$ je relativní efektivní permitivita a h je tloušťka textilu. Šířka fličky může být vypočtena [1]:

$$L_p = \frac{c}{2 \cdot f_r \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} - 2 \cdot \Delta L \quad (3)$$

kde ΔL představuje prodloužení vlivem rozptylových polí [1]:

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0,3) \left(\frac{W_p}{h} + 0,264 \right)}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0,258) \left(\frac{W_p}{h} + 0,8 \right)} \quad (4)$$

Vypočtená šířka fličky je $W_p = 24,66$ mm a jeho délka $L_p = 19,77$ mm. Vlnová délka ve volném prostoru a v textilu se pak spočítá dle [1]:

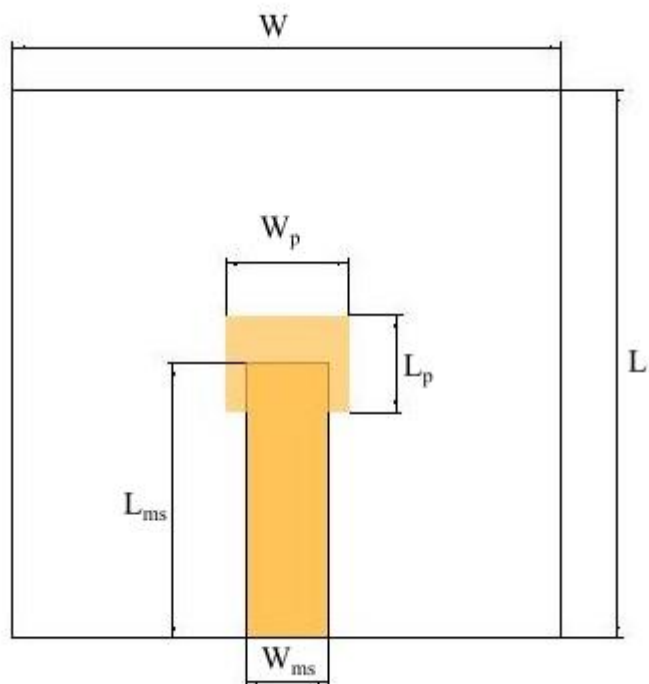
$$\lambda = \frac{c}{f_r} \quad (5)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (6)$$

Výsledkem těchto výpočtů je $\lambda = 51,72$ mm a $\lambda_0 = 47,20$ mm.

1.3 Jeden element

Jelikož vypočtené rozměry neodpovídaly pracovní frekvenci 5,8 GHz, musela být šířka a délka fličky parametricky změněna. Výsledná struktura je zobrazena na obrázku 2.



Obrázek 2 Rozměry výsledné struktury s jedním elementem.

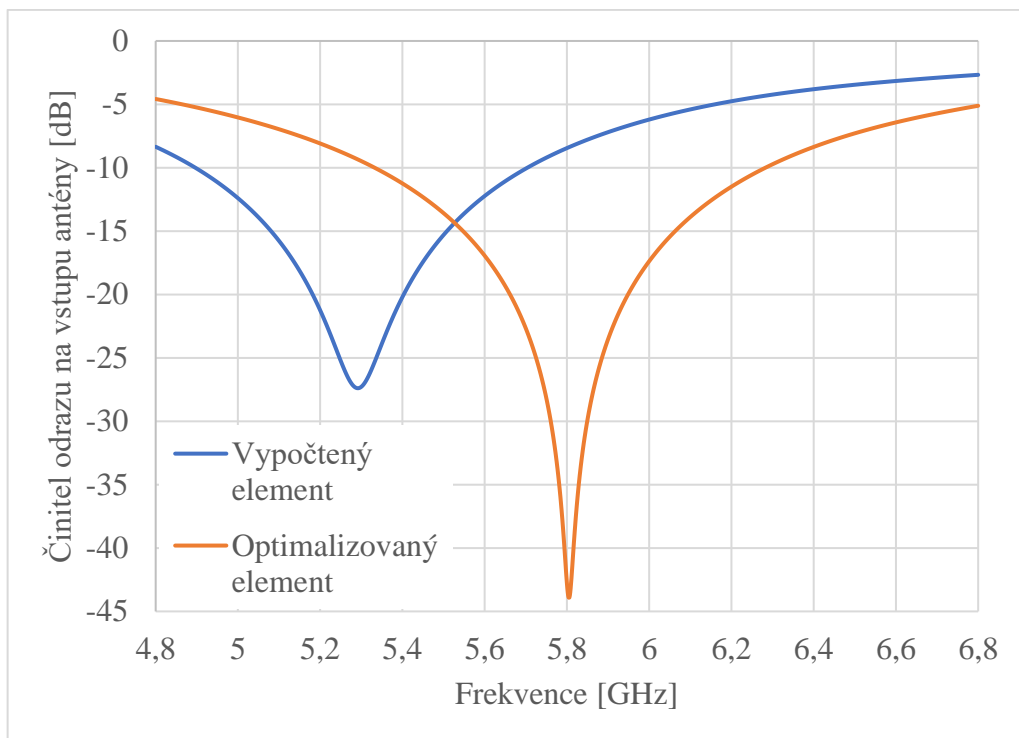
Tabulka 1 Rozměry výsledné struktury s jedním elementem.

W	100,00 mm	W _p	22,50 mm
L	100,00 mm	L _p	17,67 mm
W _{ms}	15,13 mm	h	3,40 mm
L _{ms}	50,00 mm	t	36,00 μm

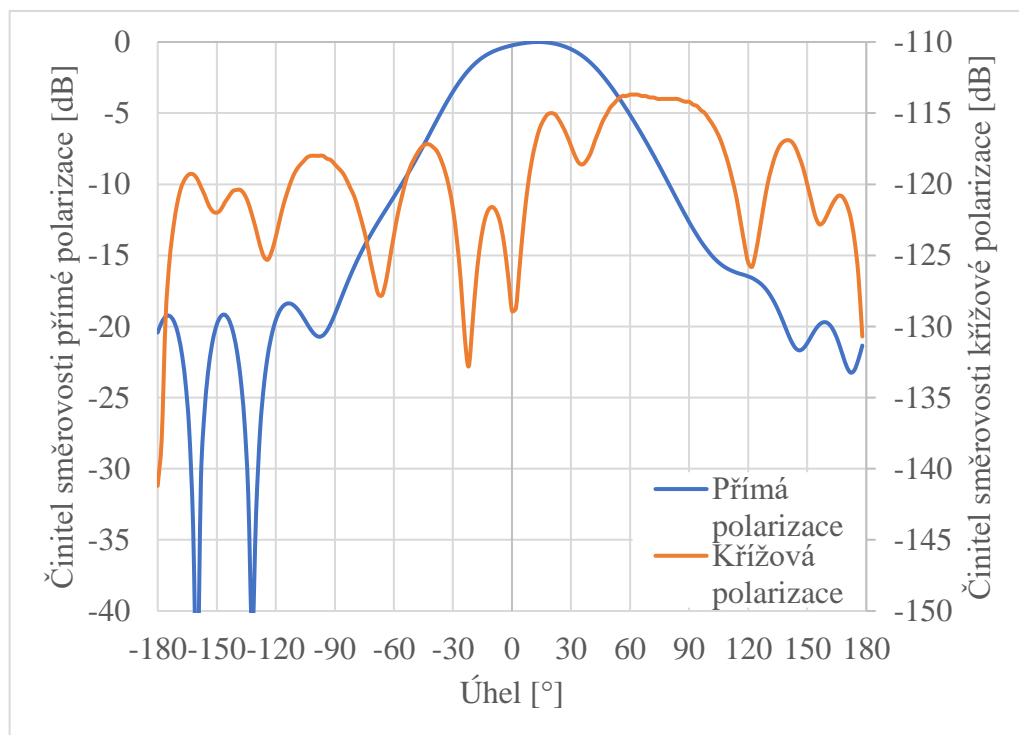
Jak je patrné z tabulky 1, při optimalizaci byly laděny pouze parametry W_p a L_p . Výsledek optimalizace je patrný z obrázku 3, kde bylo dosaženo impedanční šířky pásma přibližně 950 MHz. Model byl modelován s přibližně 1 milionem diskretizačních buněk.

Na obrázku 4 lze vidět, že maximum vyzařování není přímo nad flíčkem, ale je posunuto vlivem parazitního vyzařování mikropásku. Tento jev lze částečně eliminovat posunutím středu flíčku z otevřeného konce mikropásku. Dále je patrné potlačení křížové složky vyzařování v rovině E. V této konfiguraci flíček dosahoval zisku 8,5 dBi s uvažováním ztrát konečnou vodivostí kovů.

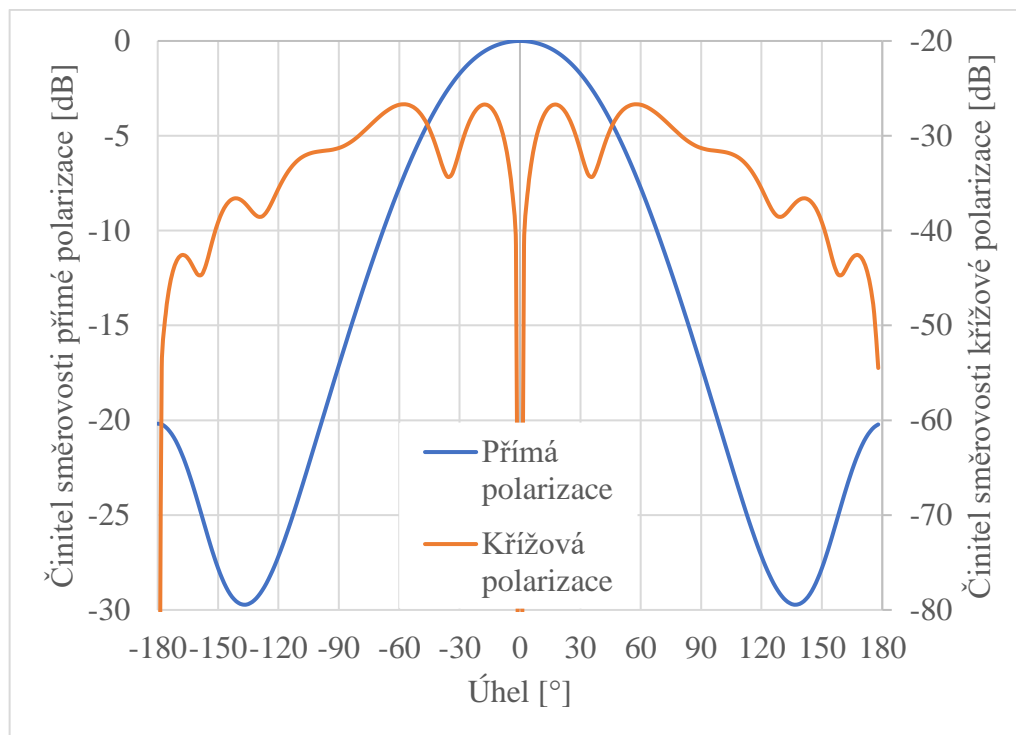
Na obrázku 5 je pak vynesena simulovaná normalizovaná směrovost pro rovinu H se ziskem 8,26 dBi.



Obrázek 3 Činitel odrazu na vstupu antény pro vypočtený a optimalizovaný flíček.



Obrázek 4 Normalizovaná směrovost optimalizovaného flíčku pro rovinu E.



Obrázek 5 Normalizovaná směrovost optimalizovaného flíčku pro rovinu H.

1.4 Více elementů

Buzení blízkým mikropáskovým vedením není vhodné pro více sériových elementů. Principiálně by na vedení měla vznikat stojatá vlna. Umístěním dalšího elementu do dalšího maxima proudu by mělo vést k soufázovému vyzařování. Ovšem vazba mezi tímto dalším elementem a mikropáskem je velmi slabá. Tím dochází pouze k deformaci vyzařovacího diagramu, a není dosaženo znatelného nárůstu zisku.

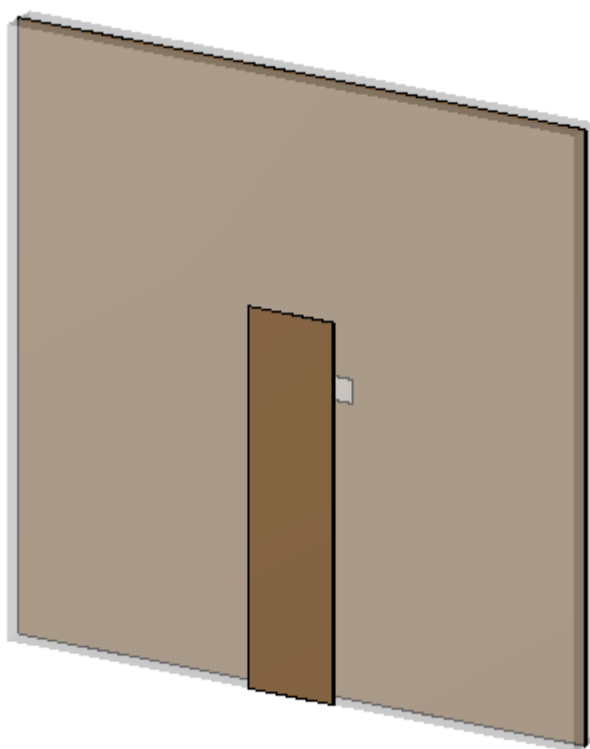
Proto bylo od tohoto způsobu napájení upuštěno.

2 ŘADA BUZENÁ ŠTĚRBINOU V ZEMNÍ ROVINĚ MIKROPÁSKU

Tato kapitola je věnována postupu návrhu řady flíčků buzených štěrbinou v zemní desce mikropáskového vedení. Toto řešení vykazuje užší šířku pásma, avšak vyniká vyšší polarizační čistotou. Výhodou této koncepce je nezávislý návrh flíčku a napájení. Přizpůsobení se provádí pomocí délky štěrbiny a šířky mikropásku.

2.1 Popis struktury

Základem struktury je mikropáskové vedení na konci naprázdno. V zemní desce tohoto vedení je pak umístěna štěrbina čtvrtinu vlnové délky v textilu λ_0 od otevřeného konce (viz obrázek 6). Na opačné straně zemní desky se nachází druhá vrstva textilu, a na ní pak flíček nad středem štěrbiny.



Obrázek 6 Struktura štěrbinou buzeného flíčku s mikropáskovým napájením.

2.2 Postup návrhu

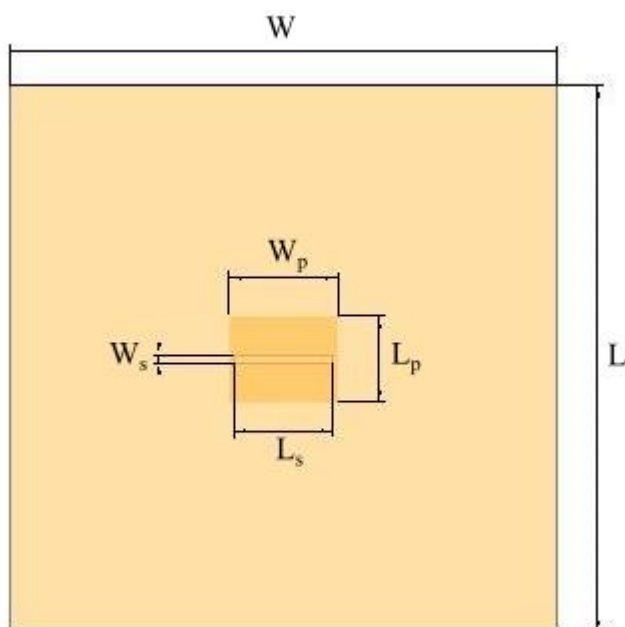
Postup návrhu je prakticky totožný s návrhem flíčku buzeného blízkým mikropáskem. Jediný rozdíl je, že pro buzení se uvažuje štěrbina.

Pomocí rovnic (1) až (4), se určí šířku flíčku jako $W_p = 24,66$ mm a jeho délka $L_p = 19,77$ mm. Ale protože tyto rozměry přesně neodpovídají rezonanční frekvenci 5,8 GHz musela být šířka flíčkové antény parametricky laděna pro dosažení rezonance.

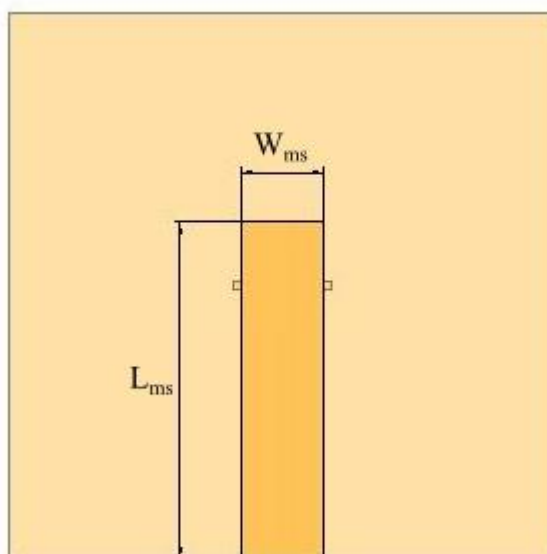
Nová hodnota šířky flíčku pro rezonanční frekvenci 5,8 GHz je $W_p = 20,00$ mm a hodnota délky $L_p = 15,80$ mm.

2.3 Jeden element

Pro lepší porovnání byla celková velikost struktury zvolena stejná jako u předchozí struktury, tj. 100x100 mm. Na následujících obrázcích 7 a 8 jsou zakótovány rozměry výsledné struktury pro jeden element. V tabulce 2 jsou pak uvedeny její reálné rozměry.



Obrázek 7 Struktura štěrbinou napájeného flíčku z horní strany.



Obrázek 8 Struktura šterbinou napájeného flíčku ze spodní strany.

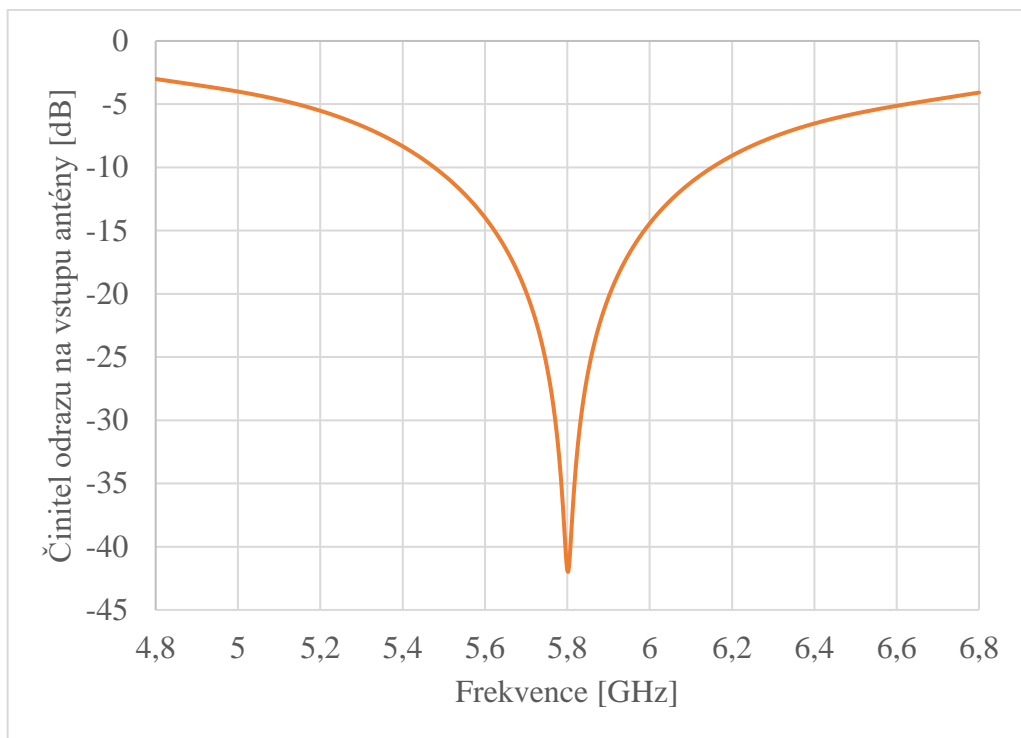
Tabulka 2 Rozměry flíčku buzeného šterbinou nad mikropáskem.

W	100,00 mm	L _p	15,80 mm
L	100,00 mm	W _{ms}	15,13 mm
W _s	1,50 mm	L _{ms}	61,80 mm
L _s	18,00 mm	h	3,40 mm
W _p	20,00 mm	t	36,00 μm

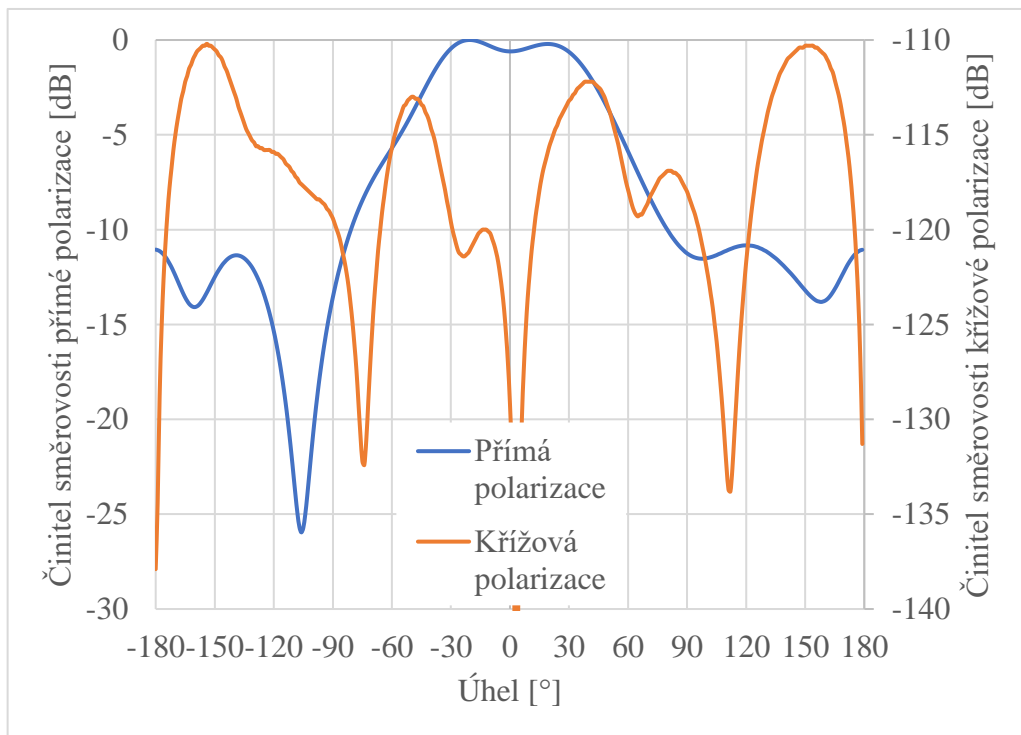
Obrázek 9 znázorňuje přizpůsobení dané struktury na vstupu padesáti ohmového vedení. Simulace byla provedena přibližně s 1 milionem diskretizačních buněk. Simulovaná šířka pásma pro pokles činitele odrazu na vstupu pod 10 dB je 670 MHz.

Na obrázku 10 jsou pak znázorněny přímá a křížová polarizace v rovině E. U přímé polarizace lze vidět mírné rozštěpení hlavního laloku, kde rozdíl oproti maximu je -0,6 dBi. Maximální zisk je 7,26 dBi s uvažováním ztrát konečnou vodivostí kovů. Dále pak zřejmé velké potlačení křížové polarizace, a tedy čistší polarizace v rovině E.

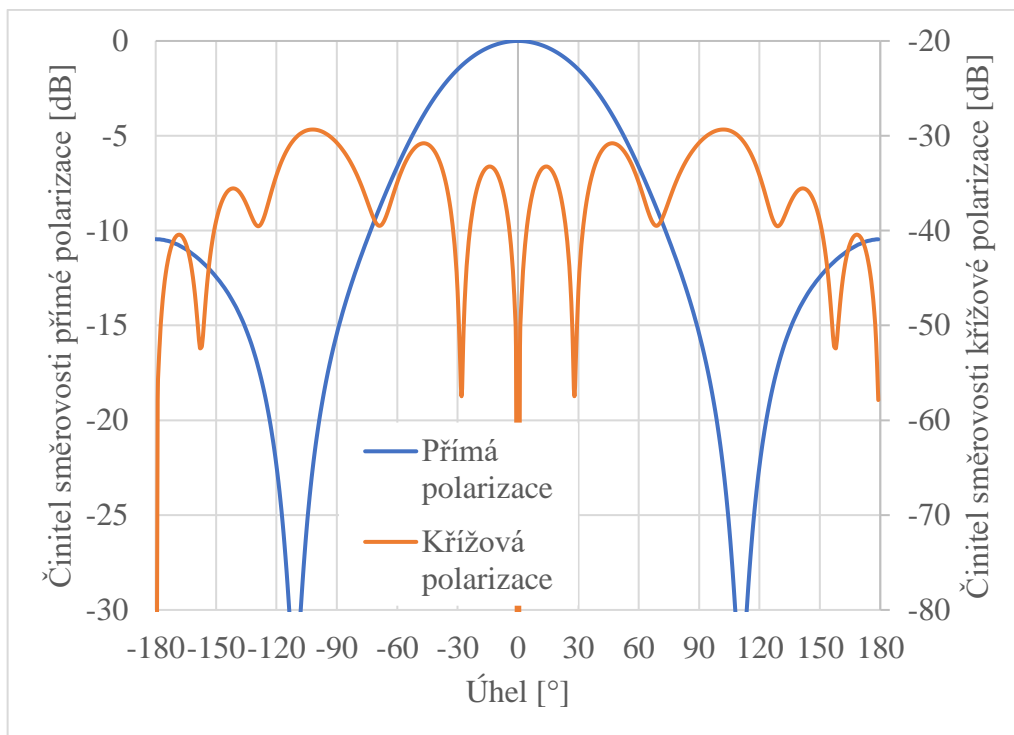
V rovině H je pak maximální zisk 6,66 dBi (viz obrázek 11). Potlačení křížové polarizace je pak přibližně 30 dB.



Obrázek 9 Činitel odrazu na vstupu mikropáskem napájené antény.



Obrázek 10 Simulovaný normovaný činitel směrovosti v rovině E.



Obrázek 11 Simulovaný normovaný činitel směrovosti v rovině H.

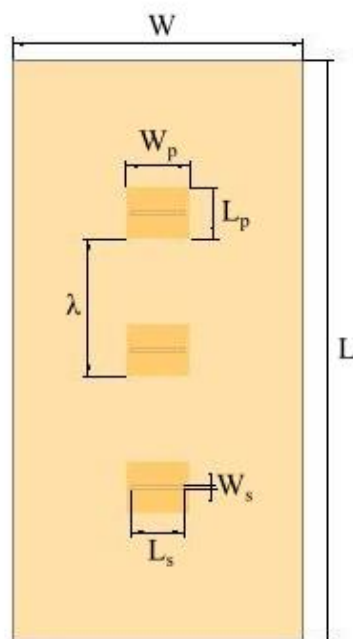
2.4 Tři elementy

Podkladem je předchozí verze s jedním flíčkem. První flíček je opět umístěn čtvrtinu vlnové délky v textilu od otevřeného konce mikropásku. Další flíčky jsou pak vždy s rozestupem jedné vlnové délky. Každý další flíček zatěžuje mikropáskové vedení svojí vlastní impedancí, a proto se nedá jednoduše použít jeden optimalizovaný element pro návrh celé řady. Proto se pro návrh jeví optimální postup popsáný v kapitole 3. Jediný rozdíl bude v náhradě podélných admitancí příčnými impedancemi [2]

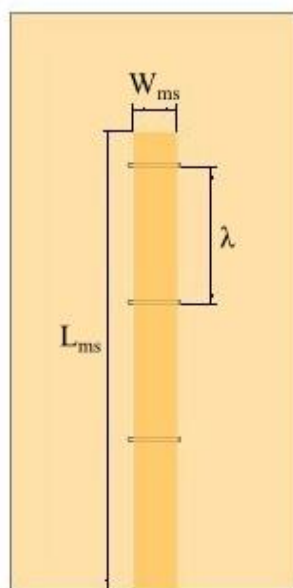
$$\frac{Z}{R_0} = \frac{R}{R_0} + j \frac{X}{R_0} = \frac{2S_{11}}{1-S_{11}} \quad (7)$$

kde Z je vlastní impedance izolovaného elementu normovaná k charakteristické rezistanci R_0 , R je vlastní rezistence, X je vlastní reaktance a S_{11} je činitel odrazu ve středu elementu.

Na obrázcích 12 a 13 jsou pak zakótovány rozměry výsledné struktury; jejich velikosti jsou pak uvedeny v tabulce 3. Vnější rozměry struktury jsou zvoleny jako 100 mm × 200 mm.



Obrázek 12 Zakótované rozměry šterbinou buzených tří flíčků z vrchní strany.



Obrázek 13 Zakótované rozměry šterbinou buzených tří flíčků ze spodní strany.

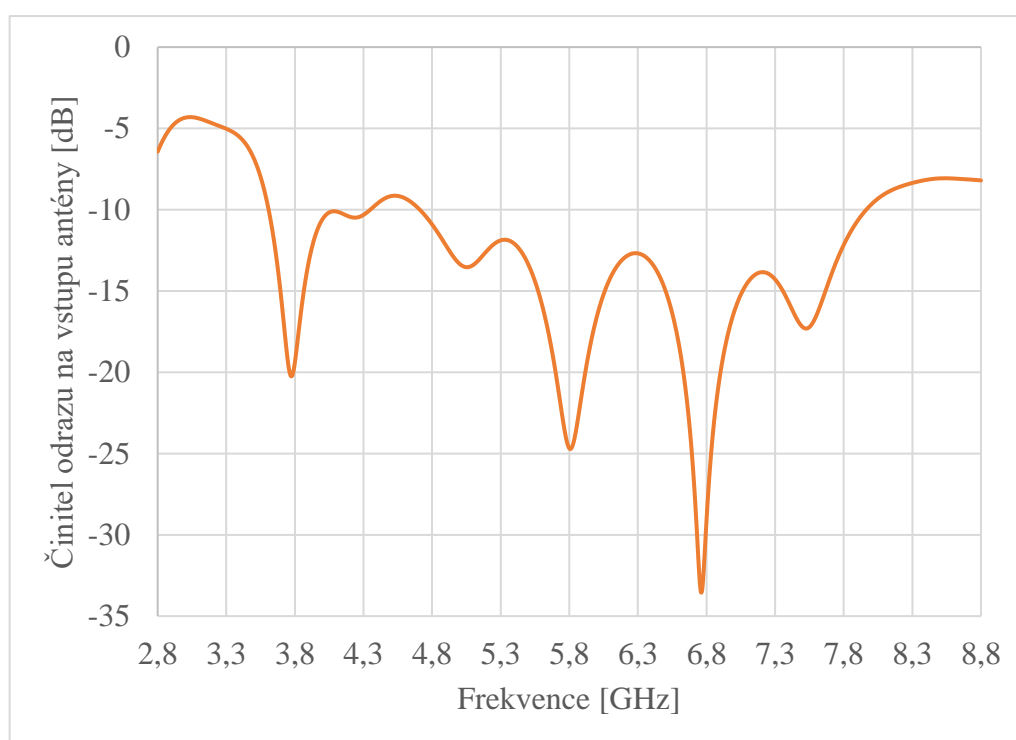
Tabulka 3 Rozměry řady tří flíčků buzených šterbinami nad mikropáskem.

W	100,00 mm	L_p	15,80 mm
L	200,00 mm	W_{ms}	15,13 mm
W_s	1,50 mm	L_{ms}	159,00 mm
L_s	21,00 mm	h	3,40 mm
W_p	21,00 mm	t	36,00 μm

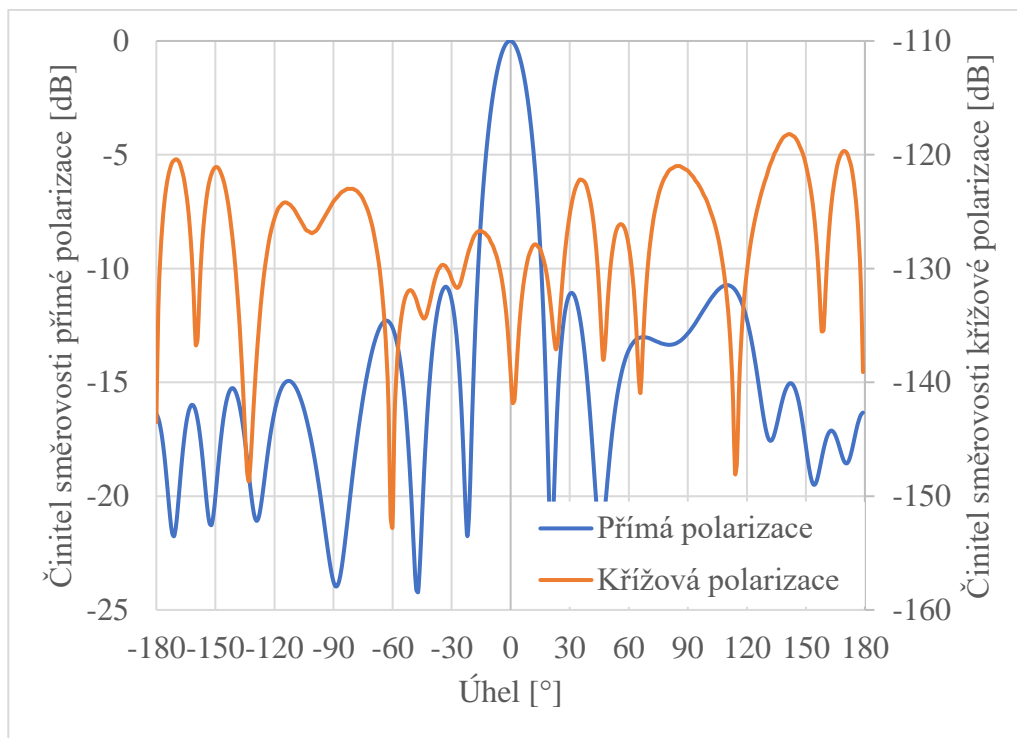
Z obrázku 14 je patrné přizpůsobení struktury na pracovní frekvenci 5,8 GHz. Impedanční šířka pásma pro pokles pod -10 dB je asi 3,25 GHz. Počet diskretizačních buněk je přibližně 2,5 milionu.

Obrázek 15 pak zobrazuje přímou a křížovou polarizaci v rovině E. Zde je patrný hlavní lalok a poměrně velké postranní laloky. Dále lze pozorovat silné zpětné záření, a to především od otevřeného konce mikropásku. Šířka hlavního laloku je $19,3^\circ$ a odstup bočních laloků 10,7 dB. Maximální simulovaný zisk pak je 12,87 dBi s uvažováním konečné vodivosti kovů. Dále je pak zřejmé vysoké potlačení křížové polarizace (přibližně 120 dB).

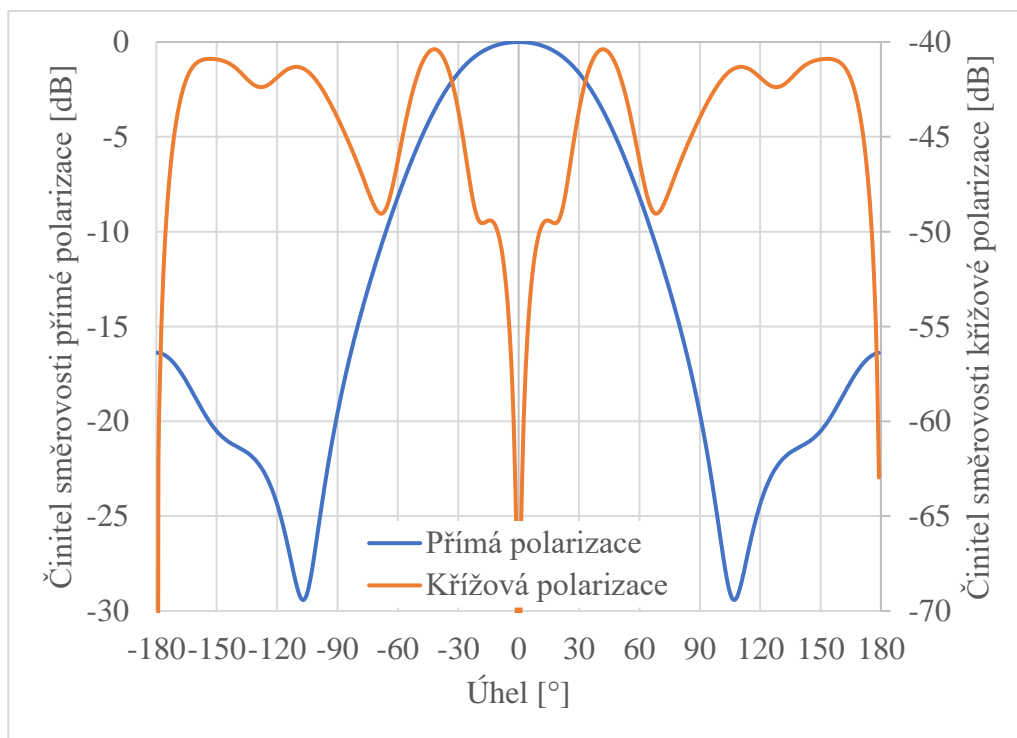
Na obrázku 16 je pak normovaná směrovost pro obě polarizace v rovině H. Šířka hlavního laloku je $76,8^\circ$ a maximální zisk 13,0 dBi. Potlačení křížové složky pak přibližně 40 dB.



Obrázek 14 Činitel odrazu na vstupu mikropásku napájecího tří elementy.



Obrázek 15 Normovaná směrovost tříprvkové antény v rovině E.



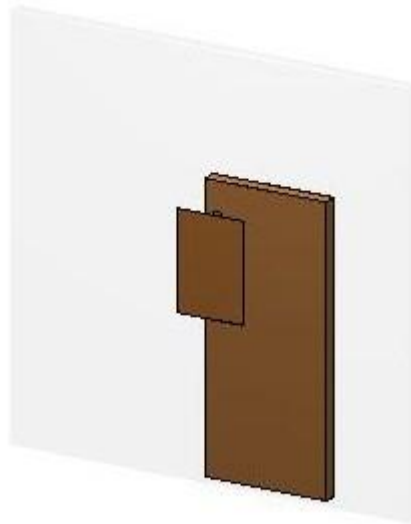
Obrázek 16 Normovaná směrovost tříprvkové antény v rovině H.

3 ŘADA BUZENÁ ŠTĚRBINOU VE VLNOVODU INTEGROVANÉM DO TEXTILU

Buzení štěrbinou ve vlnovodu integrovaném do textilu je další z možností napájení flíčkové antény. Napájecí síť i samotný flíček jsou na samostatných textilních substrátech a vazbu mezi nimi zajišťuje štěrbina v zemní desce. Oproti přímému buzení antény nabízí větší šířku pásma a možnost použít pro každou strukturu textil s jinou relativní permitivitou a výškou. V porovnání s napájením pomocí mikropásku tato realizace má menší zpětné vyzařování a účinnější buzení na vyšších kmitočtech. Pro toto řešení lze použít příčné nebo podélné štěrby, kde výhoda podélných štěrbin spočívá v poloviční délce struktury se stejným počtem vyzařujících prvků.

3.1 Popis struktury

Napájecí síť se skládá z 3D textilu, který tvoří dielektrický substrát a dvou kovových zemních desek tvořících stěny TIW. Konec vlnovodu je zakončen zkratem. Ve vrchní zemní desce je štěrbina, která zajišťuje vazbu mezi TIW a flíčkem. Flíček je umístěn uprostřed nad štěrbinou na druhé vrstvě 3D textilu viz obrázek 17.



Obrázek 17 Model struktury flíčku buzeného štěrbinou v TIW vlnovodu.

3.2 Postup návrhu

Zjednodušený model TIW vlnovodu vypočteme pomocí [3]:

$$W_{TIW} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}} \cdot \frac{c}{2f_r} \quad (8)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, ε_{r1} je relativní permitivita textilu ve vlnovodu a f_r je mezní frekvence základního módu TE_{10} v TIW. Pro základní mód vlnovodu se používá šířka pásma 1,25 až 1,90 mezní frekvence vlnovodu f_r .

Prvotní délku flíčku L_p vypočteme pomocí [3]:

$$L_p = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{2} \quad (9)$$

kde λ_{eff} je efektivní vlnová délka dána vztahem

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\lambda_0}{\varepsilon_{\text{eff}}} \quad (10)$$

a ε_{eff} značí efektivní permitivitu textilu

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_{r2} + 1}{2} \quad (11)$$

kde ε_{r2} je relativní permitivita textilu pod flíčkem.

Přesnější výpočet délky flíčku není důležitý, protože parametr L_p bude sloužit jako ladící prvek optimalizace.

Dalším důležitým parametrem je pozice středu podélné štěrby y_s od zkratované stěny vlnovodu, která je dána [3]:

$$y_s = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{0,25}{\sqrt{\varepsilon_{r1}}} \cdot \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_r}\right)^2}} \quad (12)$$

kde λ_g je délka vlny ve vlnovodu, λ_0 vlnová délka ve volném prostoru a λ_r je vlnová délka na mezní frekvenci vlnovodu TIW. Pro největší šířku pásma a zisk by měl být posun štěrby od středu vlnovodu x_s zvolen co nejblíže okraje TIW.

Dalším parametrem pro optimalizaci bude délka štěrby L_s , která ovlivňuje velikost vazby mezi napájecí sítí a flíčkem. Tento parametr je značně závislý na tloušťce a vlastnostech použitých textilií. Pro naši aplikaci byla zvolena jako počáteční hodnota 80 % maximální velikosti L_s . Maximální velikost délky štěrby je polovina vlnové délky vlny v TIW vlnovodu λ_g . Šířka flíčku by měla být o něco málo větší, než je délka štěrby L_s , ale stejně jako délka štěrby by neměla přesahovat polovinu vlnové délky v dielektriku λ_g . Šířka štěrby W_s nemá zásadní vliv na parametry antény, a proto může být volena mezi desetinou a dvacetinou L_s podle doporučení [3].

3.3 Optimalizace jednoho elementu

Základem optimalizace je Elliottova procedura návrhu flíčkové řady na SIW vlnovodu [2]. V této práci jsou štěrby s flíčky nahrazeny zkraty s aktivní admitancí Y . Vlastní admitance Y jednotlivých elementů je pak získána pomocí struktury (viz. obr. 18), kde do středu v podélném směru průchozího vlnovodu je umístěna štěrbina s flíčkem. Referenční rovina portu je posunuta do středu štěrby a je zjišťována hodnota normované reálné a imaginární admitance v tomto bodě pomocí [2]

$$\frac{Y}{G_0} = \frac{G}{G_0} + j \frac{B}{G_0} = \frac{-2S_{11}}{1+S_{11}} \quad (13)$$

kde Y je vlastní admitance izolovaného elementu normovaná k charakteristické vodivosti G_0 , G je vlastní vodivost, B je vlastní susceptance a S_{11} je činitel odrazu ve středu elementu.

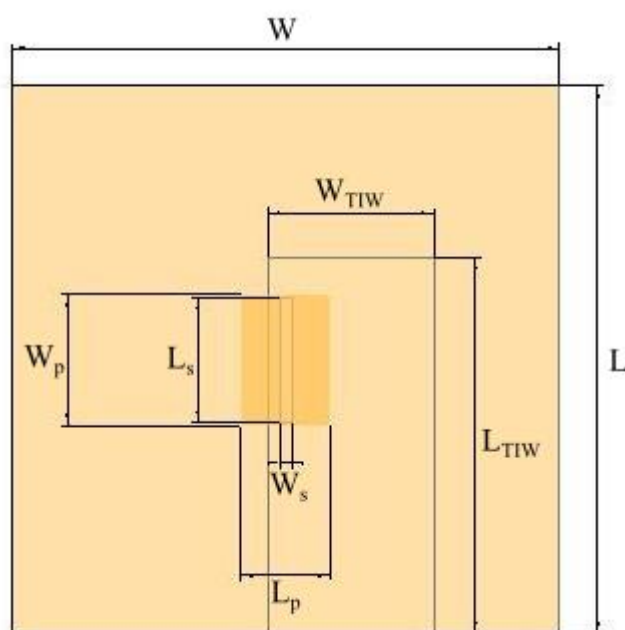
Cílem je pro součet všech elementů ve struktuře dostat reálnou část normované admitance na 1 a imaginární naopak na 0. Tím by se mělo docílit výsledného přizpůsobení celé struktury pouhou optimalizací dvou parametrů L_s a L_p . Pokud imaginární část normované admitance neklesne na nulu v pracovní frekvenční oblasti je potřeba přidat prokov do TIW na opačné straně, než je štěrbina. Tímto krokem by se mělo docílit snížení imaginární normované admitance na potřebnou velikost.



Obrázek 18 Struktura pro návrh řady elementů pomocí Elliotovi procedury.

3.4 Jeden element

Pomocí postupu popsaného v předchozí podkapitole byl navržen jeden flíček na operačním kmitočtu 5,8 GHz a jeho rozměry jsou zakótovány na obrázku 19 a velikosti pak v tabulce 4. Vnější rozměr struktury je 100x100 mm pro jednoduší porovnání s předchozími modely.



Obrázek 19 Rozměry výsledné struktury pro jeden zářící element.

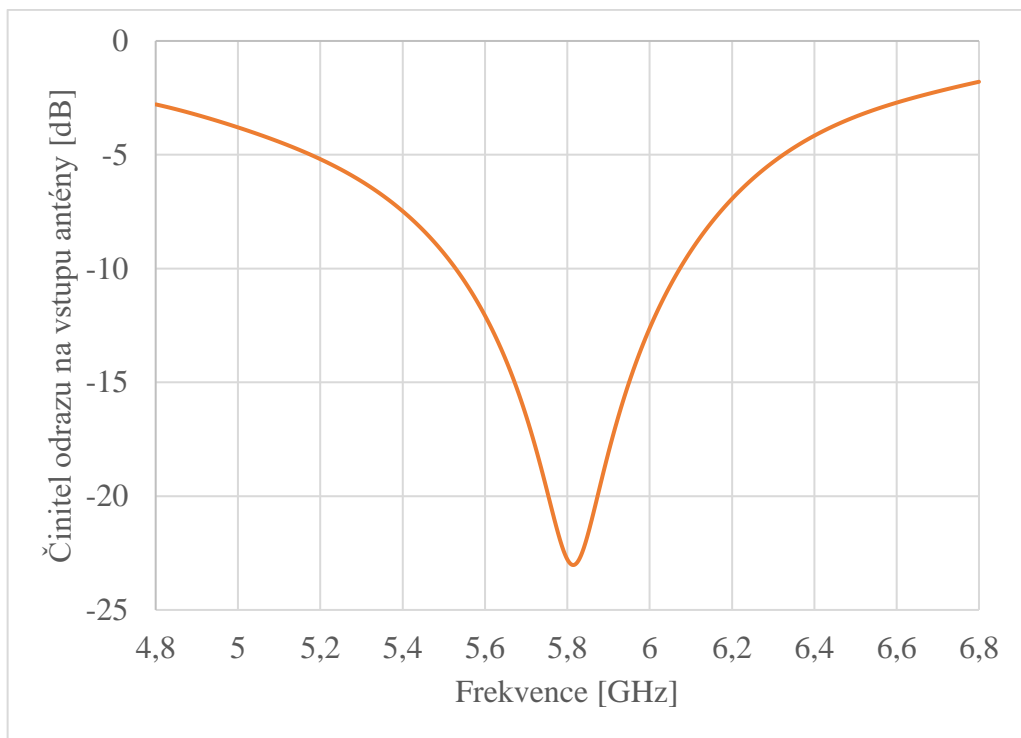
Tabulka 4 Rozměry jednoho elementu na vlnovodu TIW.

W	100,00 mm	W _s	2,50 mm
L	100,00 mm	L _s	28,00 mm
t	36,00 μm	W _p	26,00 mm
h	3,40 mm	L _p	18,80 mm
W _{TIW}	30,40 mm	x _s	12,00 mm
L _{TIW}	68,71 mm	y _s	18,71 mm
λ _g	74,84 mm	λ ₀	47,20 mm

Impedanční šířka pásma pro pokles činitele odrazu na vstupu antény pod 10 dB je přibližně 540 MHz viz obrázek 20. Model byl simulován s 1 mil síťovacích buněk.

Na obrázku 21 je pak vyzařovací diagram v rovině E. Opět je patrné mírné rozštěpení hlavního laloku do stran. Kde v přímém směru od antény je zisk o 0,68 dBi menší v porovnání s maximem. Maximální zisk pak je 8,03 dBi s uvažováním ztrát a impedančním nepřizpůsobením. Potlačení křížové složky je minimálně 45 dB.

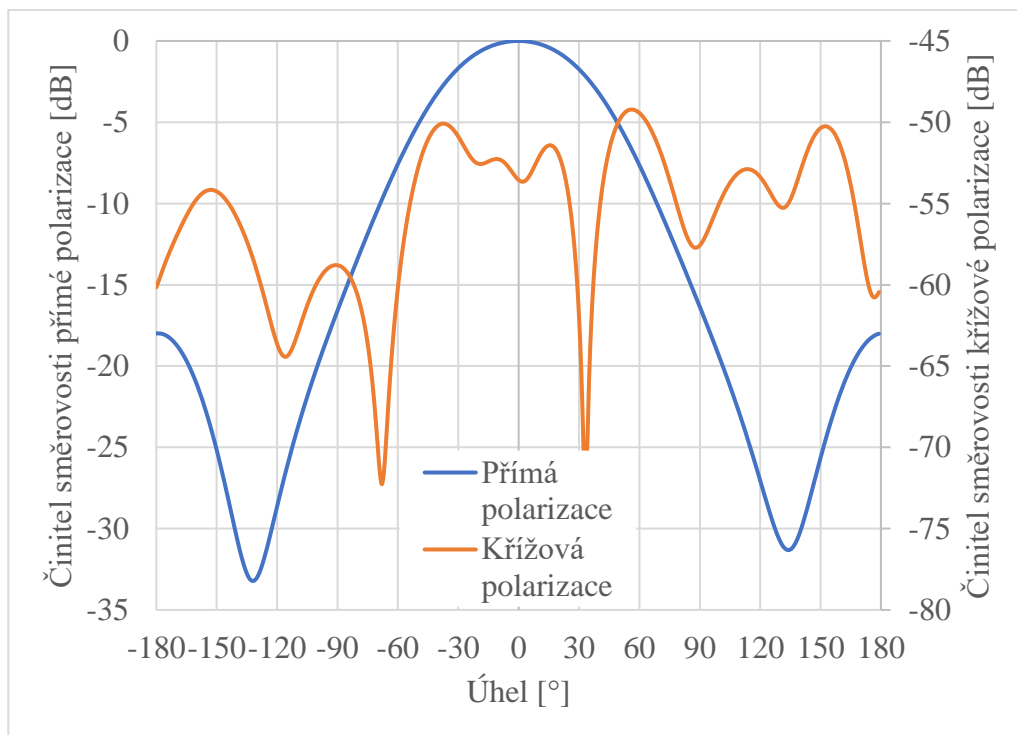
Obrázek 22 zobrazuje vyzařovací diagram v rovině H. Maximální zisk 7,36 dBi a potlačení křížové polarizace přibližně 50 dB.



Obrázek 20 Činitel odrazu na vstupu vlnovodu TIW s jedním elementem.



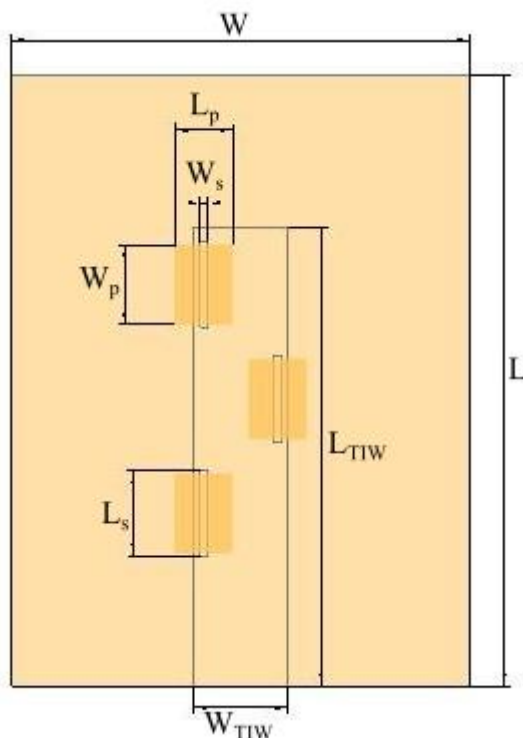
Obrázek 21 Vyzařovací diagram v rovině E pro TIW s jedním elementem.



Obrázek 22 Vyzařovací diagram v rovině H pro TIW s jedním elementem.

3.5 Tři elementy

Opět byl použit postup návrhu jako v předchozím bodě. Vzdálenost mezi jednotlivými elementy je polovina vlnové délky vlny ve vlnovodu λ_g . Elementy jsou střídavě rozmístěny na strany vlnovodu. Poslední element je středem vzdálen od konce vlnovodu TIW čtvrtinu vlnové délky λ_g . Výsledné rozměry jsou zobrazeny na obrázku 23 a velikosti pak v tabulce 5.



Obrázek 23 Rozměry výsledné struktury pro tři zářící elementy.

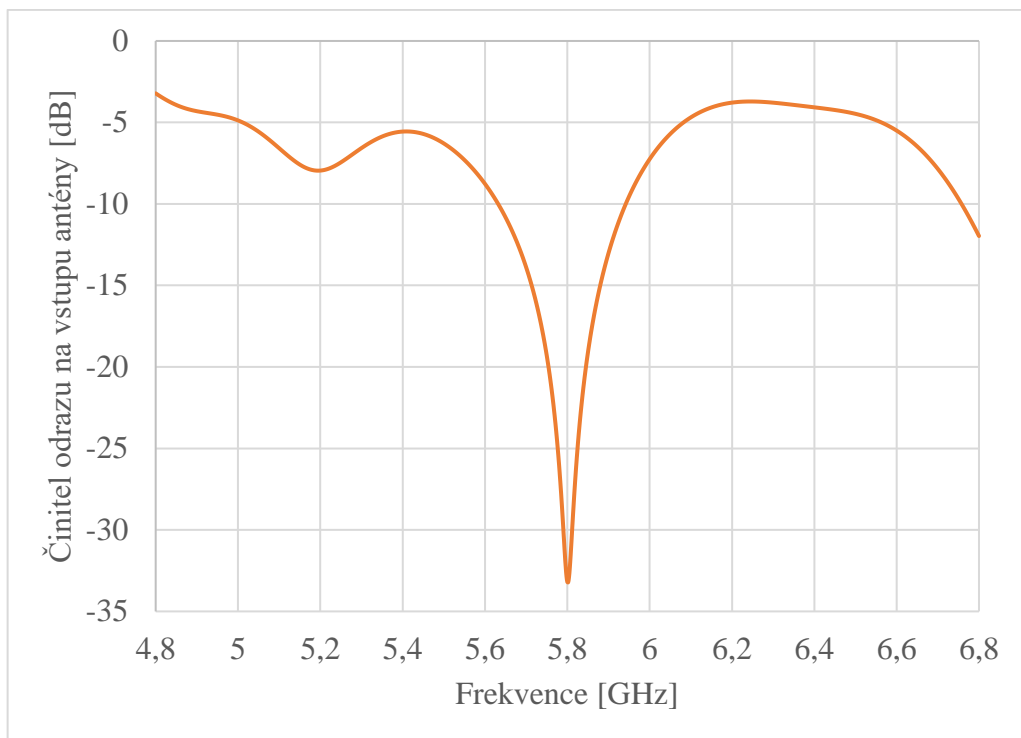
Tabulka 5 Rozměry tříprvkové řady na vlnovodu TIW.

W	150,00 mm	W _s	2,00 mm
L	200,00 mm	L _s	23,00 mm
t	36,00 μm	W _p	25,00 mm
h	3,40 mm	L _p	16,15 mm
W _{TIW}	30,40 mm	x _s	12,00 mm
L _{TIW}	150,00 mm	y _s	18,71 mm
λ _g	74,84 mm	λ ₀	47,20 mm

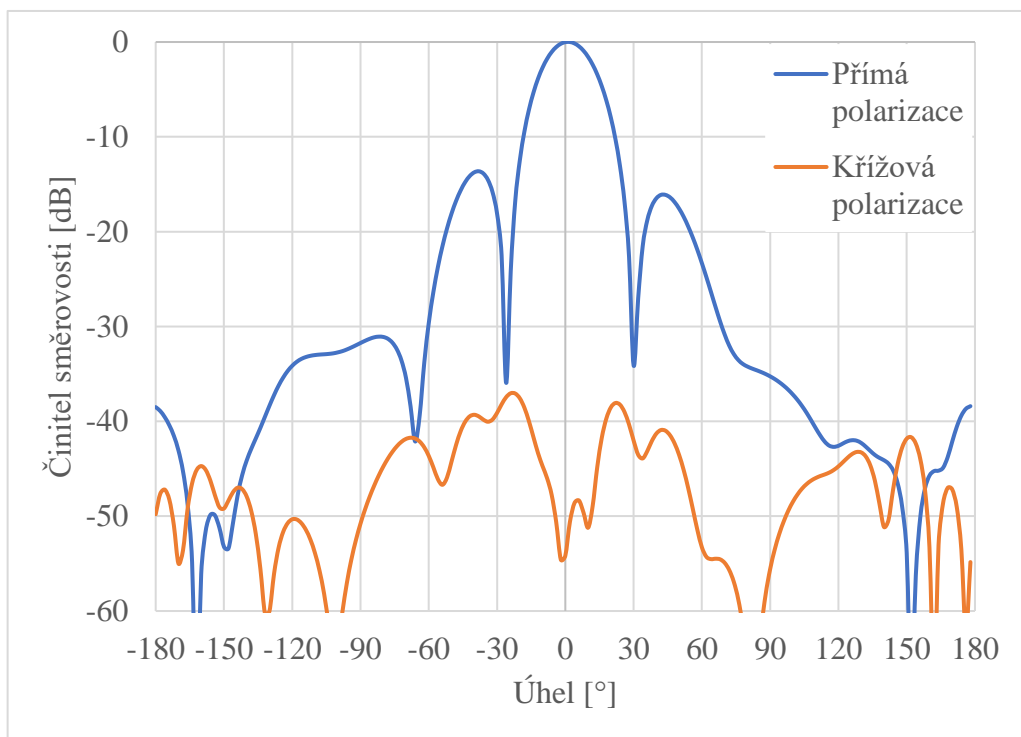
Simulovaná šířka pásma je pouhých 310 MHz (viz obrázek 24). Simulace byla provedena s 2 miliony diskretizačních buněk.

Na vyzařovacím diagramu v rovině E lze vidět hlavní lalok a dva větší postranní laloky, obrázek 25. Odchylka hlavního laloku od přímého směru vyzařování je 2°. Maximální zisk s uvažováním ztrát 13,5 dBi. Šířka hlavního laloku 23,7° a odstup postranních laloků od maxima 13,6 dB. Poměrně nízké zpětné vyzařování v porovnání s napájením pomocí mikropásku. Potlačení křížové polarizace asi 40 dB.

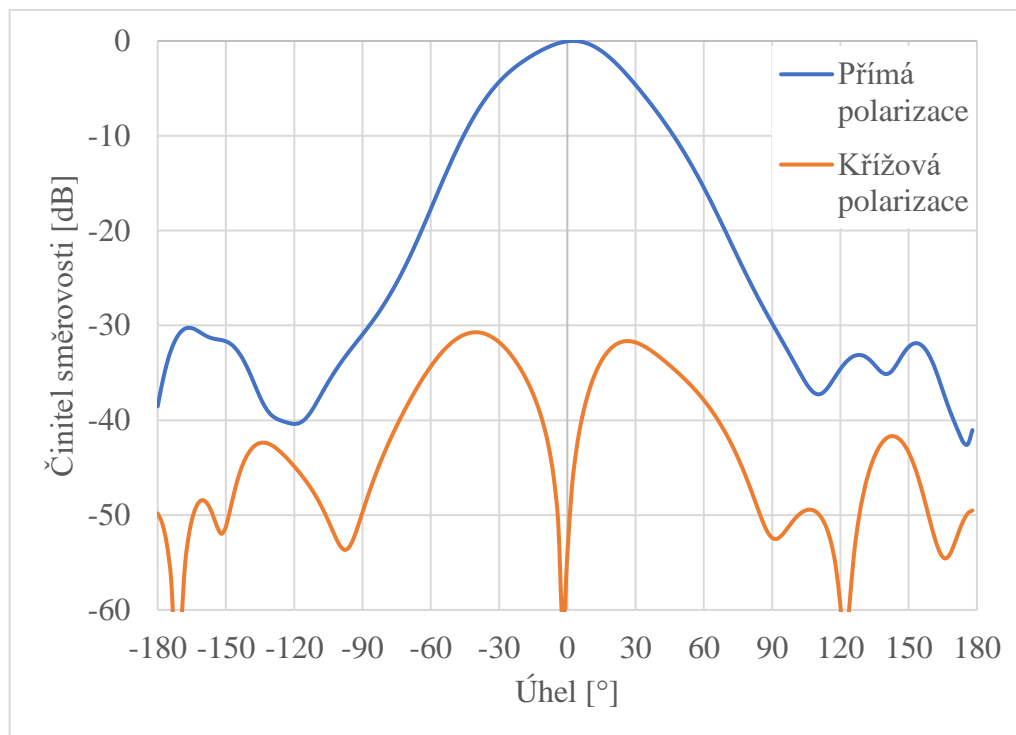
V rovině H pak je maximální zisk 13,6 dBi (viz obrázek 26). Odchylka úhlu od přímého směru je 2° a šířka hlavního laloku 48,1°. Potlačení křížové polarizace přibližně 30 dB v přímém směru.



Obrázek 24 Činitel odrazu na vstupu TIW se třemi elementy.



Obrázek 25 Normovaný vyzařovací diagram v rovině E pro TIW se třemi elementy.



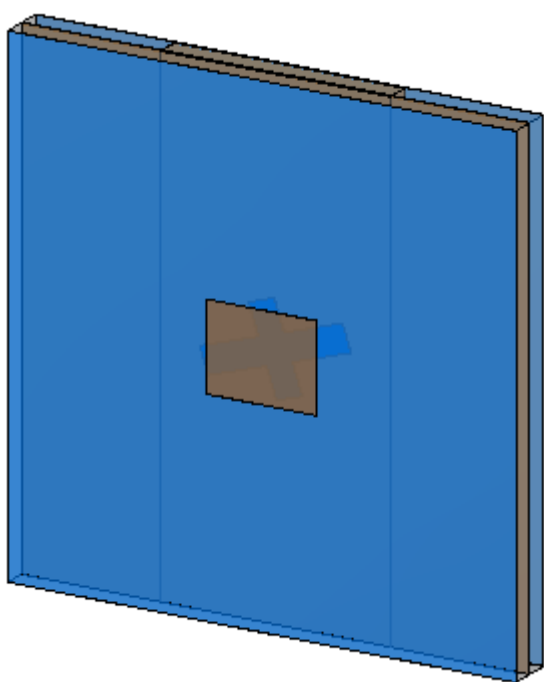
Obrázek 26 Normovaný vyzařovací diagram v rovině H pro TIW se třemi elementy.

3.6 Jeden element s kruhovou polarizací

Pro komunikaci uvnitř letadla je výhodné použít kruhovou polarizaci kvůli vícenásobným odrazům od kovových stěn. Z tohoto důvodu byla vytvořena struktura vlnovodu integrovaného do textilu s křížovou štěrbínou a flíčkem umístěným nad ní.

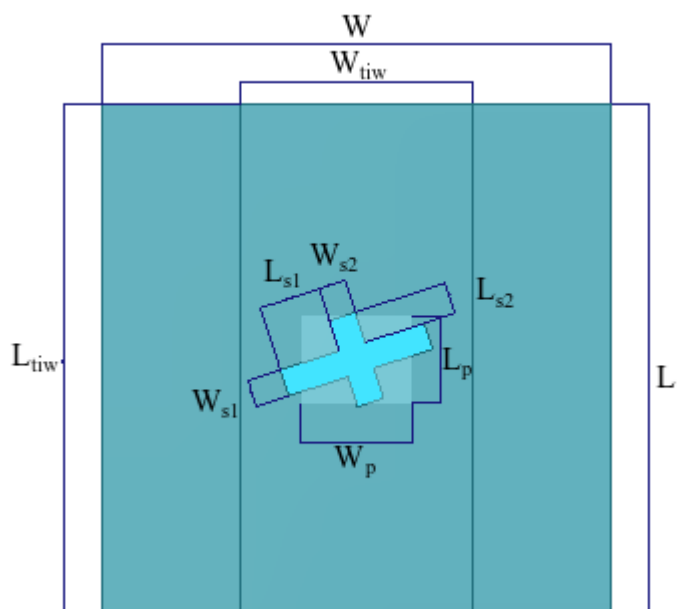
Model je zobrazen na obrázku 27. Tvoří jej vlnovod integrovaný do textilu ve spodní vrstvě substrátu. Polovinu vlnové délky ve vlnovodu od konce je umístěna křížová štěrbina, která je mírně natočena. Na další vrstvě substrátu je pak umístěný obdélníkový flíček nad středem křížové štěrbiny.

U tohoto modelu již byla od začátku provedena optimalizace s ohledem na výrobní proces viz kapitola 4. Proto byl pod každou kovovou vrstvou použit model fólie, na kterou je stříbrná pasta sítotiskem nanесena. Tato fólie má tloušťku t_f 80 μm a relativní permitivitu 3,1 viz [9].



Obrázek 27 Model TIW s kruhově polarizovaným flíčkem.

Rozměry navržené struktury jsou zakótovány na obrázku 28 a jejich velikosti pak v tabulce 6.

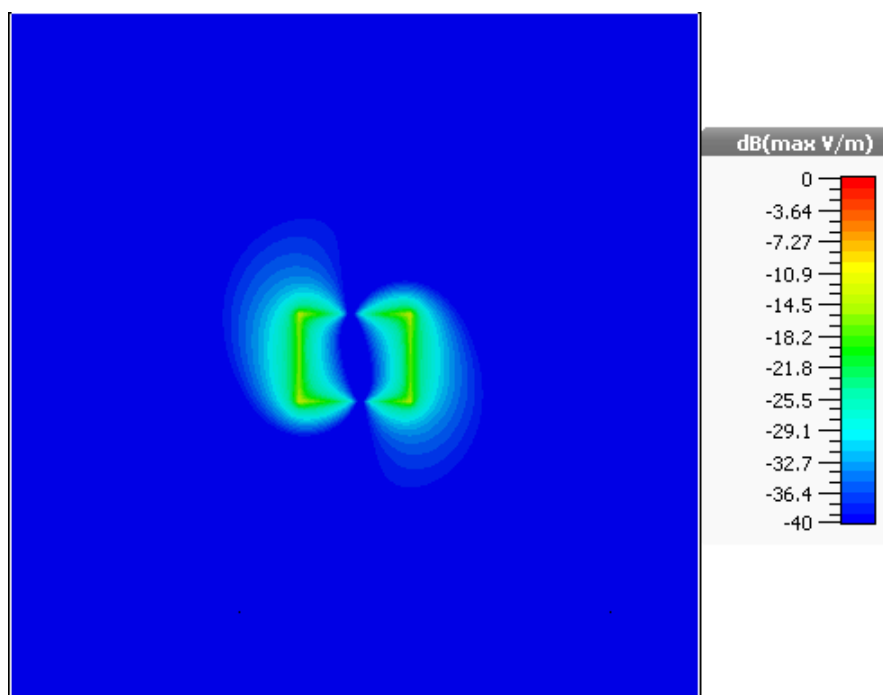


Obrázek 28 Zakótované rozměry kruhově polarizovaného flíčku nad TIW.

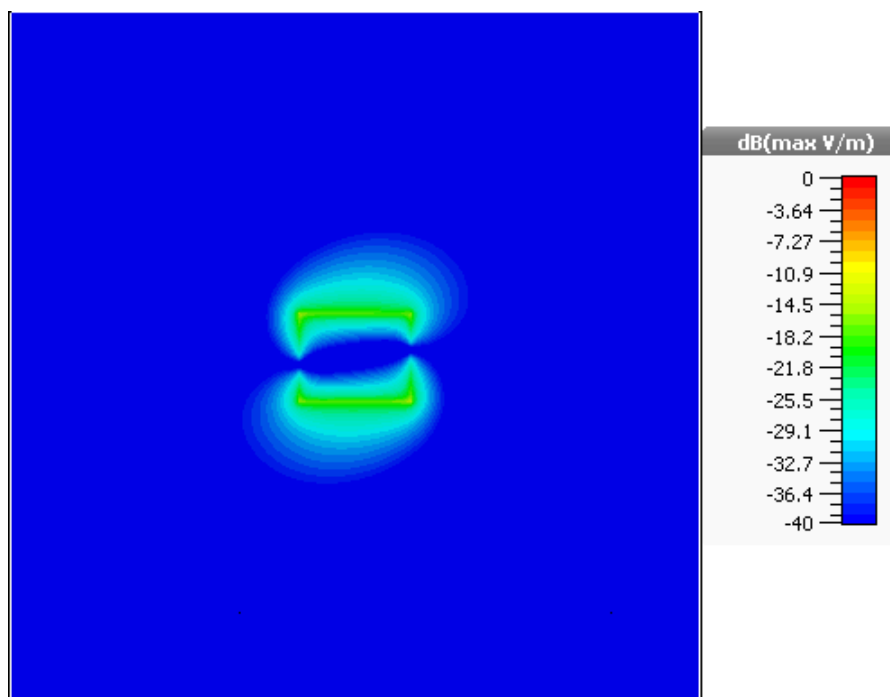
Tabulka 6 Velikosti rozměrů kruhově polarizovaného flíčku nad TIW.

W	75,00 mm	L_{s2}	4,66 mm
L	75,00 mm	W_p	16,38 mm
W_{tiw}	34,00 mm	L_p	12,91 mm
L_{tiw}	74,84 mm	t	36,00 μm
W_{s1}	4,00 mm	t_f	0,08 mm
L_{s1}	9,09 mm	h	3,40 mm
W_{s2}	4,00 mm	y_s	37,42 mm

Rozložení elektrického pole v různých fázích, a tedy i kruhová polarizace je patrná z obrázků 29 a 30.

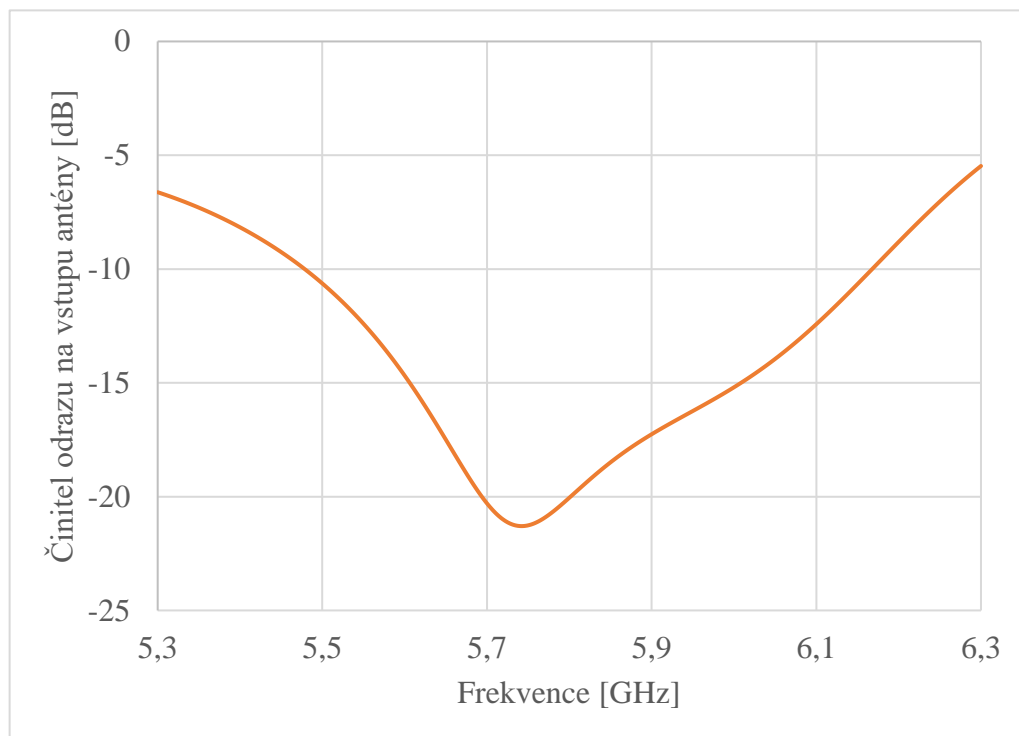


Obrázek 29 Rozložení elektrického pole na flíčku (fáze 0°).

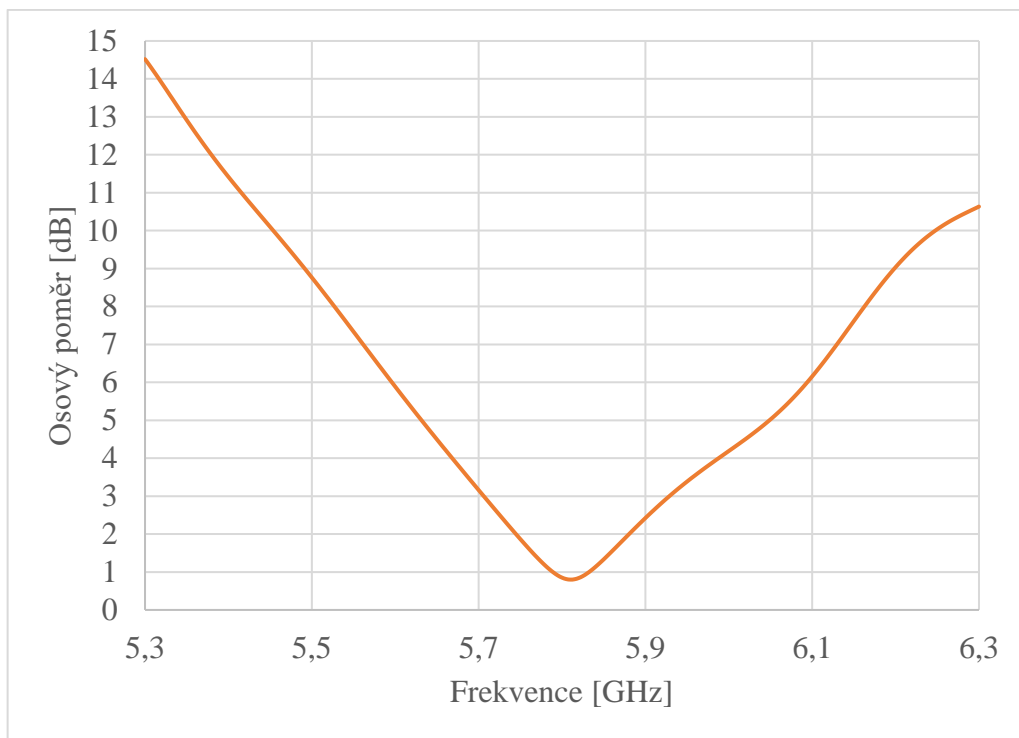


Obrázek 30 Rozložení elektrického pole na flíčku (fáze 90°).

Impedanční přizpůsobení je na obrázku 31. Impedanční šířka pásma pro pokles činitele odrazu o 10 dB je při 1 mil. síťovacích buněk 688 MHz. Na obrázku 32 je vynesena osový poměr. Šířka pásma pro pokles osového poměru pod 3 dB je 215 MHz.

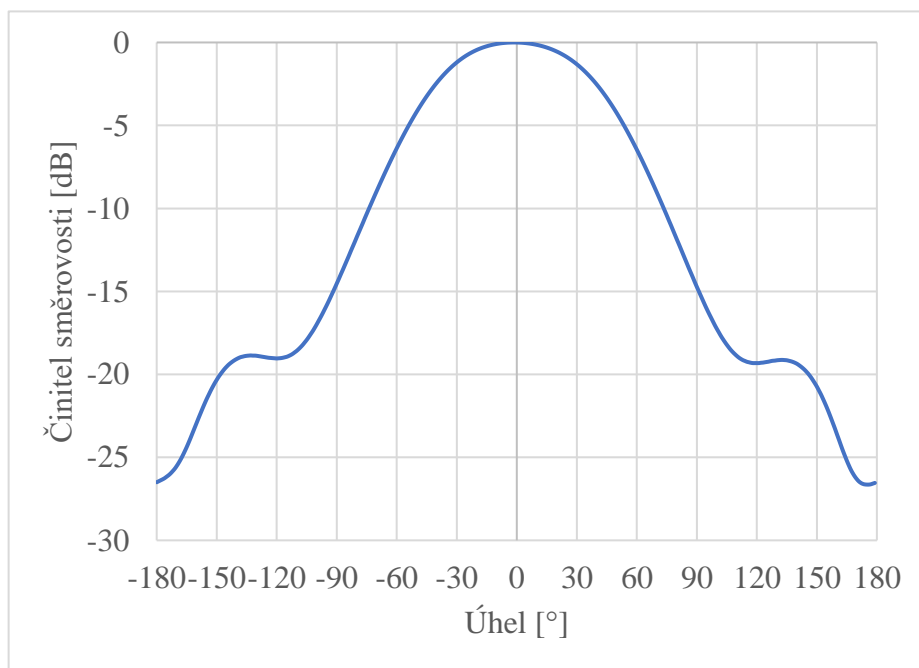


Obrázek 31 Činitel odrazu na vstupu antény pro jeden element s kruhovou polarizací.

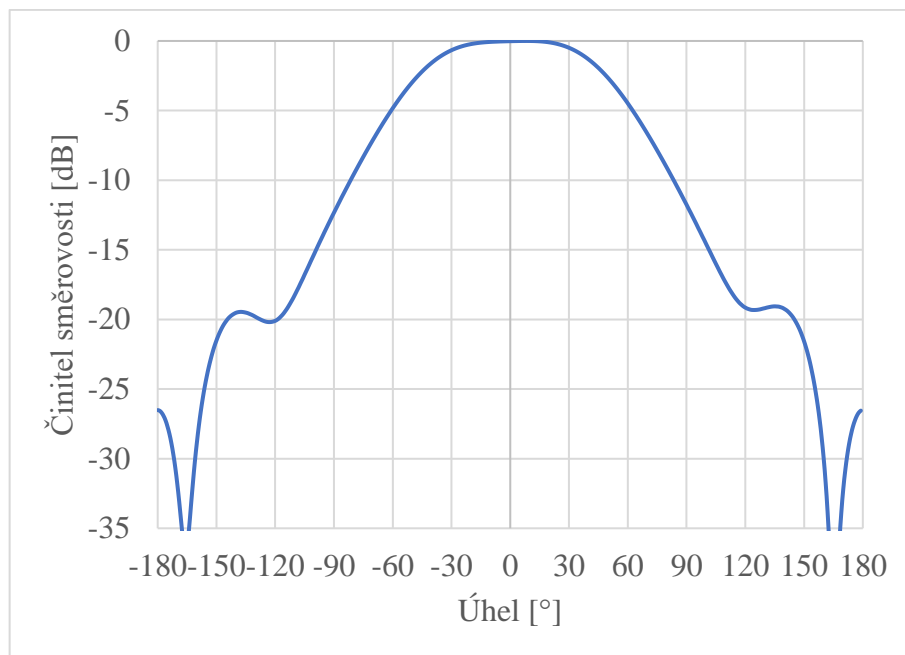


Obrázek 32 Osový poměr pro jeden element s kruhovou polarizací.

Vyzařovací diagram pro roviny E a H je na obrázcích 33 a 34. Anténa je navržena s pravotočivou polarizací. Simulovaný zisk v přímém směru v rovině E je 7,01 dBi a v rovině H 7,02 dBi.



Obrázek 33 Činitel směrovosti v rovině E pro jeden element s kruhovou polarizací.



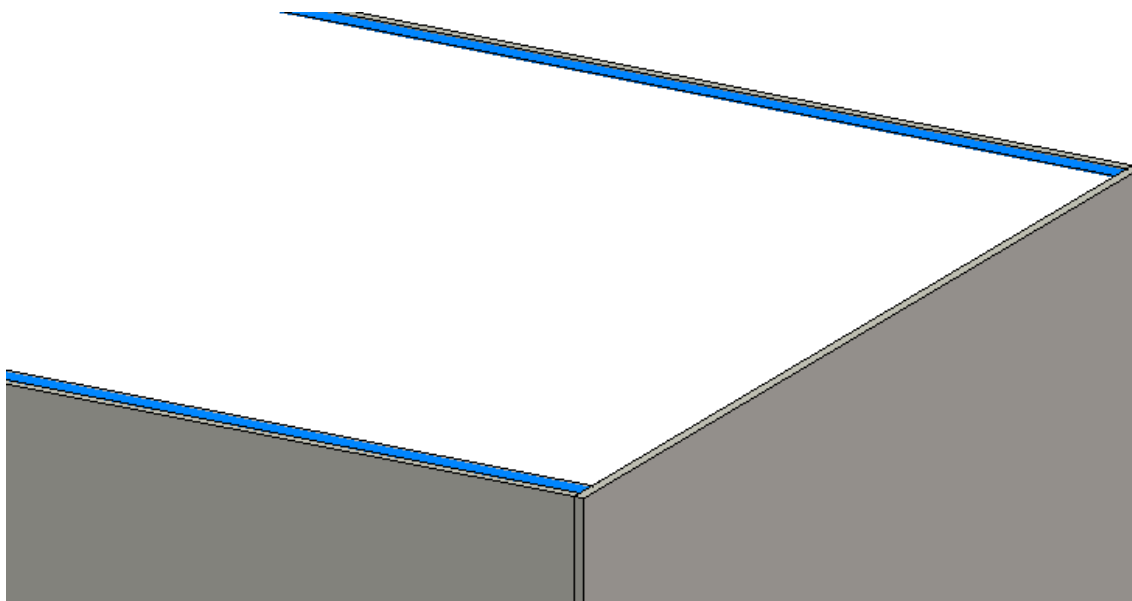
Obrázek 34 Činitel směrovosti v rovině H pro jeden element s kruhovou polarizací.

4 OPTIMALIZACE

Kapitola je zaměřena na optimalizaci výsledné řady s ohledem na výrobní proces. V první části je důležité zjistit jaký vliv má nažehlovací fólie, která slouží jako podklad pro stříbrnou pastu. Dále je důležité prozkoumat vliv nahrazení dokonale vodivých bočních stěn vlnovodu modely prokovů imitujících prošívané vodivou nití. Nakonec je potřeba kvůli měření této struktury navrhnout přechod z TIW na koaxiální konektor. Při návrhu přechodu bylo čerpáno z práce [10].

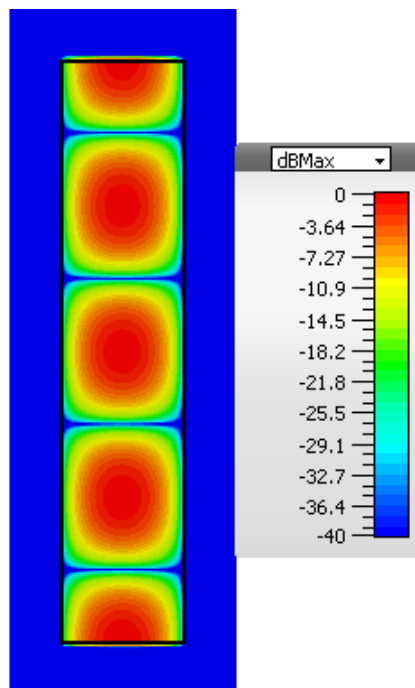
4.1 Optimalizace s ohledem na proces výroby

Pro zjištění vlivu nažehlovací fólie na rozložení pole uvnitř vlnovodu, a tedy i zjištění změny vlnové délky uvnitř je použit model samostatného průchozího vlnovodu TIW. Mezi textil a kovový povrch je umístěna nažehlovací fólie o tloušťce 80 μm a relativní permitivitě 3,1. Použitá fólie Digiflex-Master foil od firmy Alphaset [9] slouží jako podklad pro polymerovou stříbrnou vodivou pastu ESL 1901-S s elektrickou vodivostí pod 20 $\text{m}\Omega/\square$ [9]. Na obrázku 35 je pak patrný vlnovod TIW s přidávanými fóliemi.



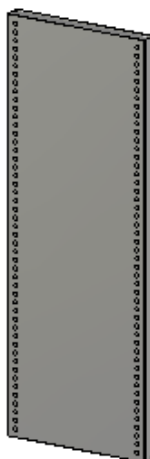
Obrázek 35 Model vlnovodu TIW s fóliemi.

Původní vlnová délka ve vlnovodu je podle simulací 74,75 mm. Z rozložení pole na obrázku 36 je patrné, že vlivem fólií se tato délka změní na 72,20 mm.



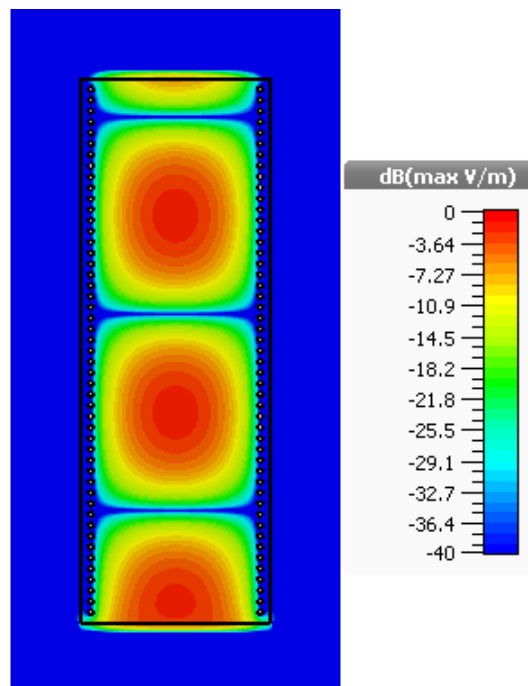
Obrázek 36 Rozložení elektrického pole uvnitř vlnovodu s fóliemi.

Dále jsou dokonale vodivé stěny TIW nahrazeny řadami prokůvů, které imitují prošívané vodivou nití. Průměr prokůvů a jejich rozstup je zvolen jako d_p 1 mm a Δ_p 2 mm což odpovídá použité niti Shieldex® 235/34 dtex 4-ply HC+B [9]. Vodivost udávaná výrobcem je pod $50 \Omega / \text{m}$. Model použitý pro simulace je na obrázku 37.



Obrázek 37 Model vlnovodu TIW s prokovy.

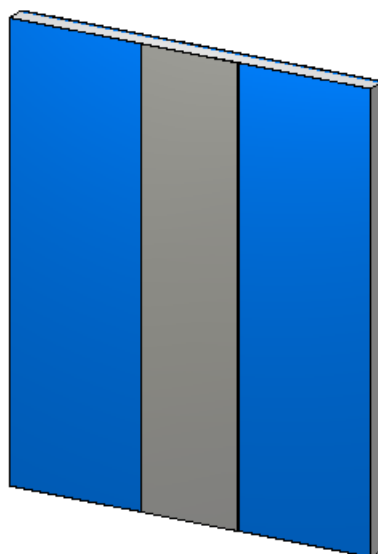
Pomocí změny parametru Δ_w , což je rozdíl mezi dokonalou vodivou stěnou a řadou prokůvů, je dosaženo stejné vlnové délky ve vlnovodu jako s dokonalou vodivou deskou. Tato hodnota Δ_w odpovídá 0,33 mm. Výsledné rozložení elektrického pole je patrné na obrázku 38.



Obrázek 38 Rozložení elektrického pole uvnitř TIW s prokovy.

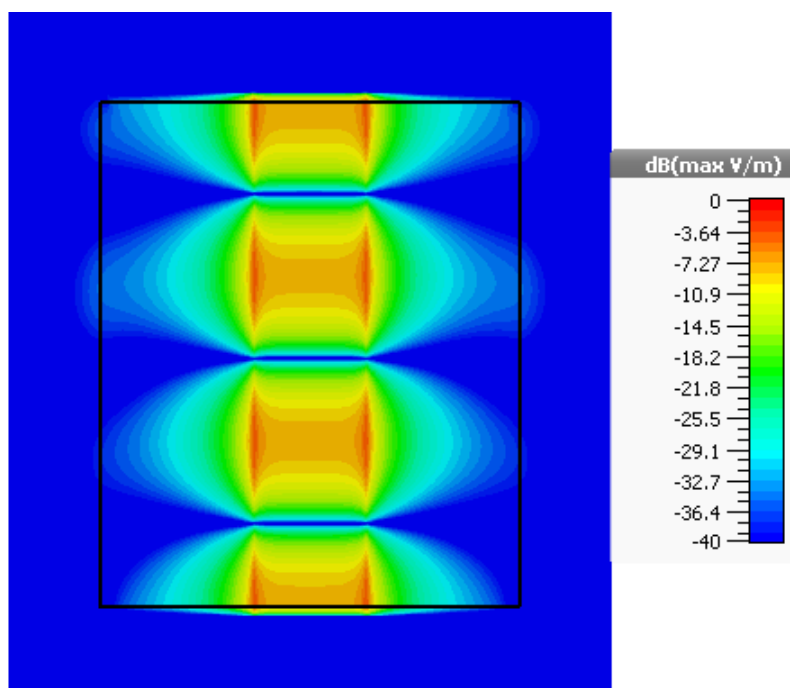
4.2 Přechod na koaxiální konektor

Prvním krokem je zjištění vlnové délky v dielektriku pro vytvoření optimálního přechodu z TIW na mikropásek. Proto byl vytvořen model samostatného mikropáskového vedení, které bylo nejprve naladěno na impedanci $50\ \Omega$ na daném dielektriku a s uvažováním fólií z kapitoly 4.1. Model je patrný na obrázku 39.



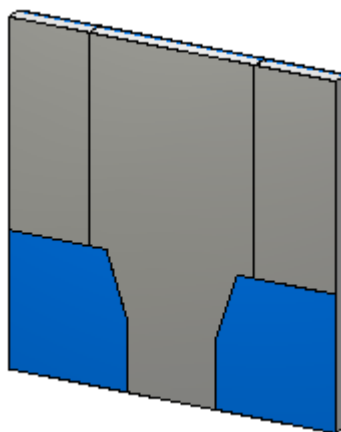
Obrázek 39 Model samostatného mikropásku.

Rozložení elektrického pole uvnitř textilu je na obrázku 40. Zjištěná vlnová délka je 47,10 mm.

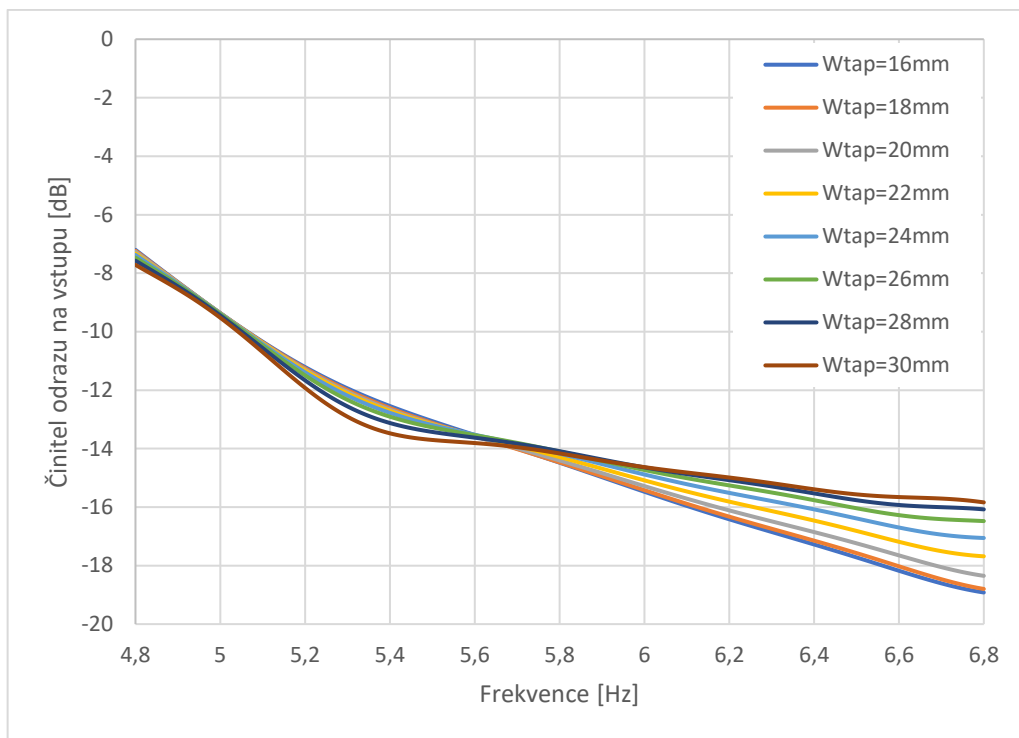


Obrázek 40 Rozložení elektrického pole uvnitř textilu s mikropáskem na povrchu.

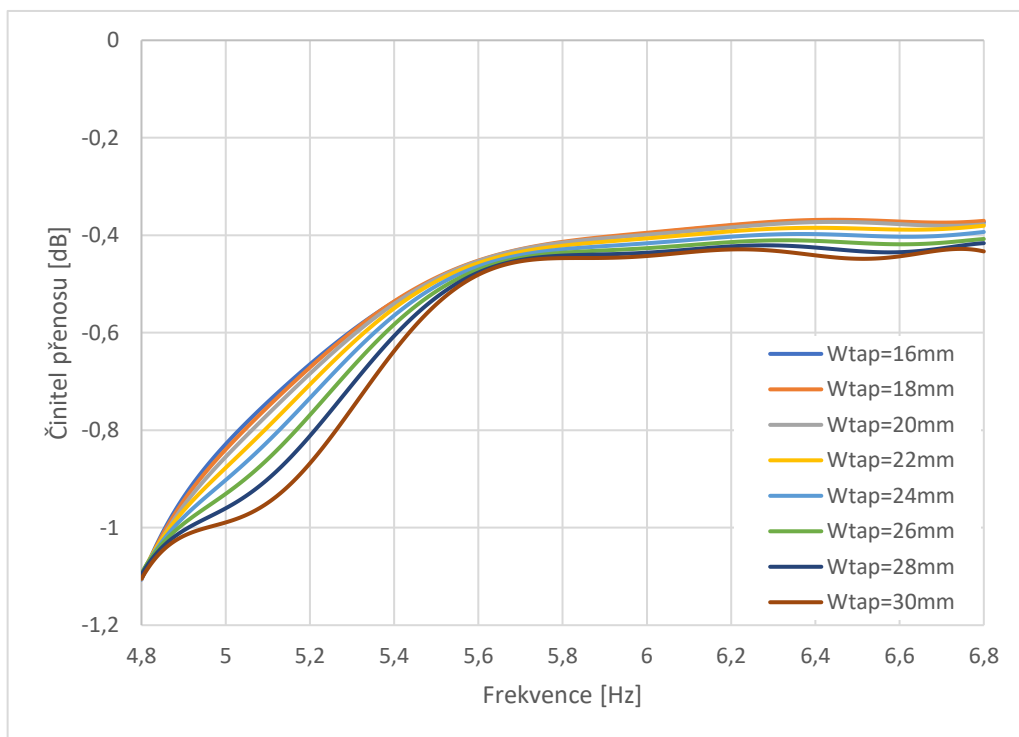
V dalším kroku je namodelován přechod z TIW na mikropáskové vedení (obrázek 41). Délka kužele je zvolena jako čtvrtina vlnové délky zjištěné v předchozím bodě. Vliv šířky kužele před začátkem vlnovodu na činitel odrazu a přenosu je zobrazen na obrázcích 42 a 43.



Obrázek 41 Model přechodu TIW mikropásek.

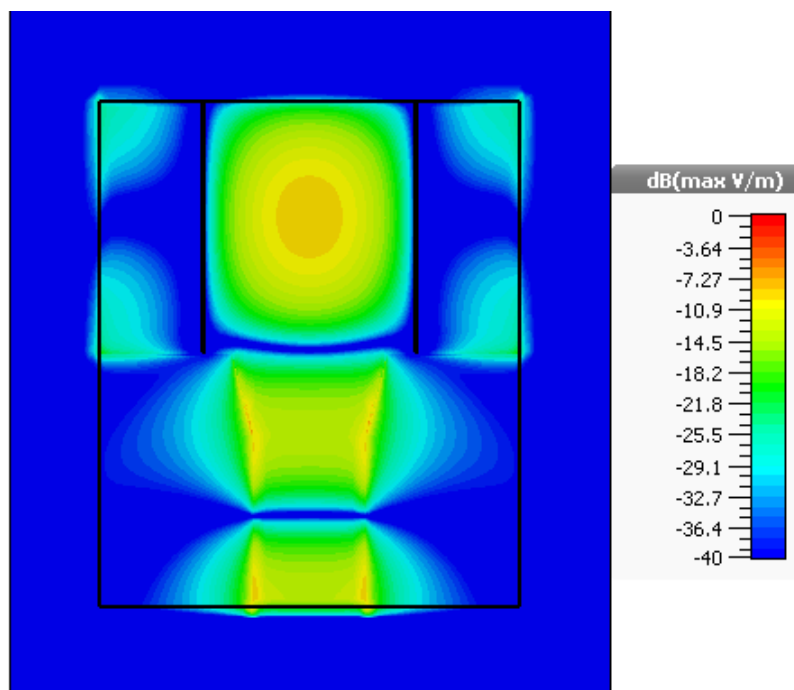


Obrázek 42 Činitel odrazu na vstupu přechodu TIW mikropásek.



Obrázek 43 Činitel přenosu přechodu TIW mikropásek.

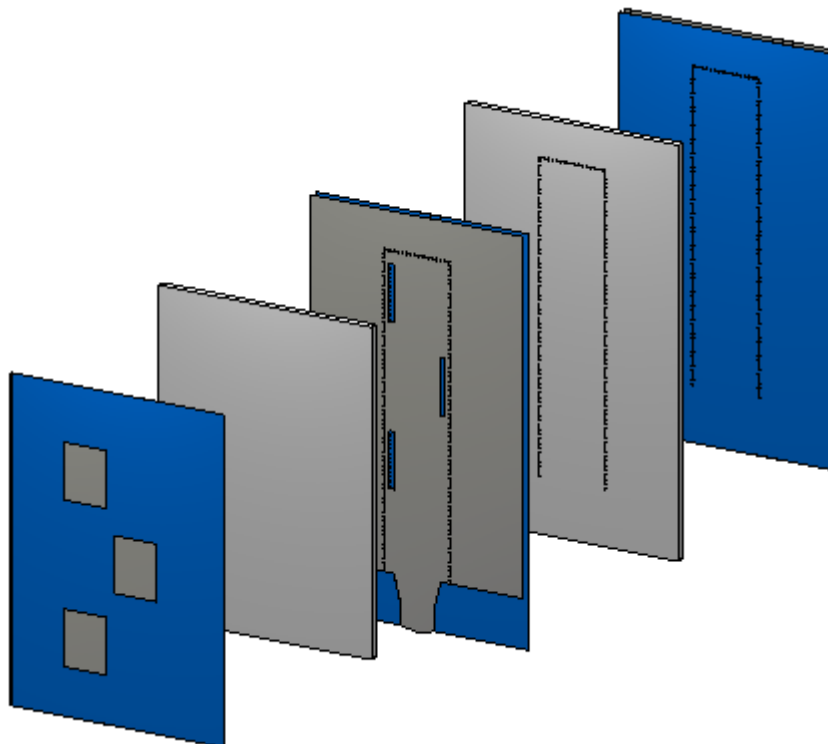
Výsledná zvolená šířka kužele je $W_{\text{tap}} 22 \text{ mm}$. Rozložení elektrického pole pro výslednou šířku kužele je na obrázku 44.



Obrázek 44 Rozložení elektrického pole v textilu na přechodu TIW mikropásek.

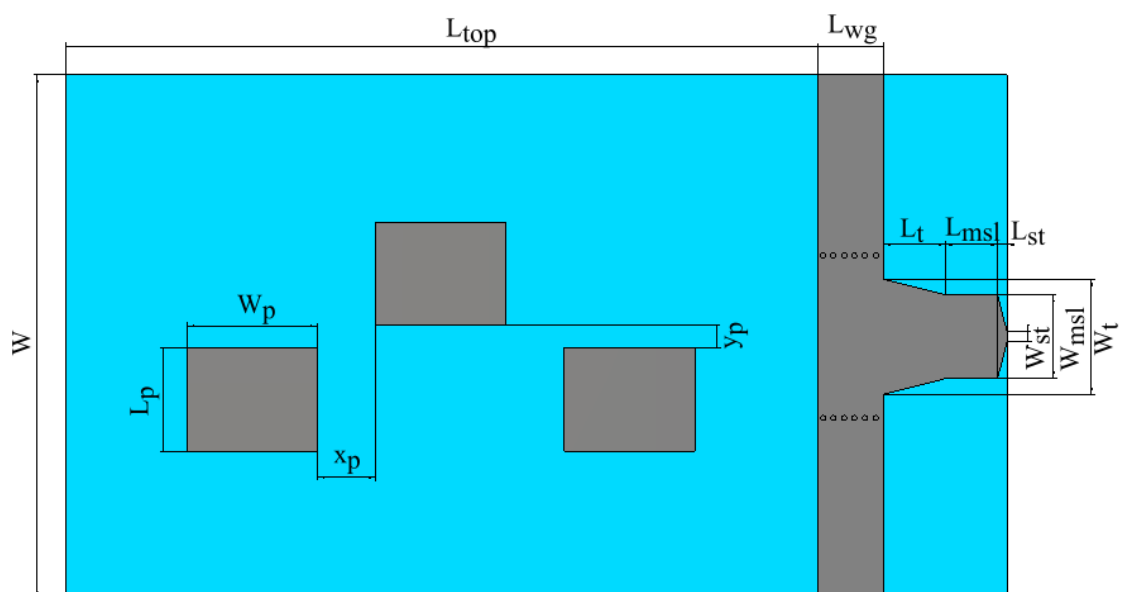
4.3 Optimalizovaná řada

Výsledkem optimalizací je struktura optimálně navržena pro výrobu a následné měření. Její model je na obrázku 45.

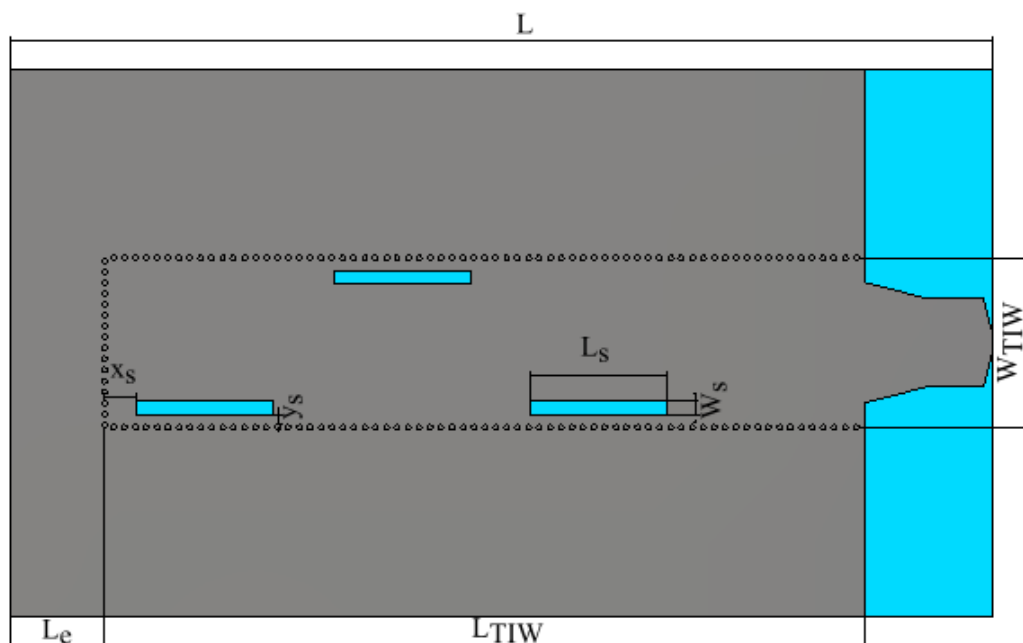


Obrázek 45 Model optimalizované anténní řady.

Dále jsou zde zakótované rozměry pro výrobu (obrázky 46 a 47).



Obrázek 46 Zakótovaná vrchní vrstva optimalizované řady.



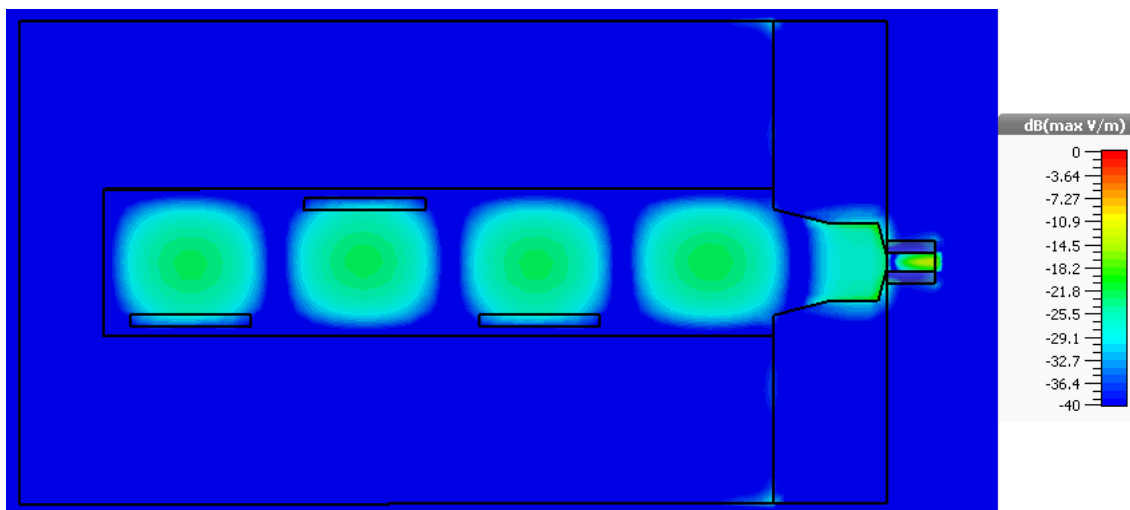
Obrázek 47 Zakótovaná prostřední strana optimalizované řady.

Rozměry optimalizované řady jsou uvedeny v tabulce 7.

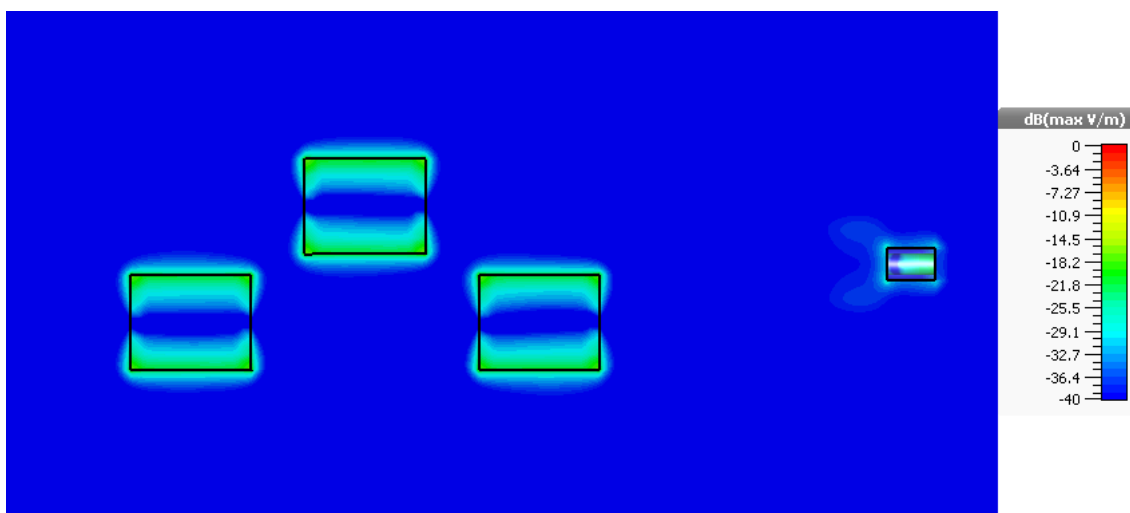
Tabulka 7 Rozměry optimalizované řady.

W	100,00 mm	L	180,00 mm
WTIW	31,06 mm	LTIW	139,18 mm
Ws	2,5 mm	Ls	25,00 mm
Wp	25,00 mm	Lp	19,70 mm
Wt	22,00 mm	Lt	11,80 mm
Wmsl	16,00 mm	Lmsl	10,00 mm
Wst	2,00 mm	Lst	1,80 mm
Ltop	143,90 mm	Lwg	12,50 mm
Le	17,22 mm	t	36,00 μm
tf	80,00 μm	h	3,40 mm
xs	5,88 mm	ys	1,78 mm
xp	11,10 mm	yp	4,30 mm
dp	1,00 mm	Δp	2,00 mm

Model byl simulován s 3,5 milionem síťovacích buněk. Rozložení elektrického pole pro dva různé průřezy modelem jsou zobrazeny na obrázcích 48 a 49.



Obrázek 48 Rozložení elektrického pole uvnitř vlnovodu TIW.

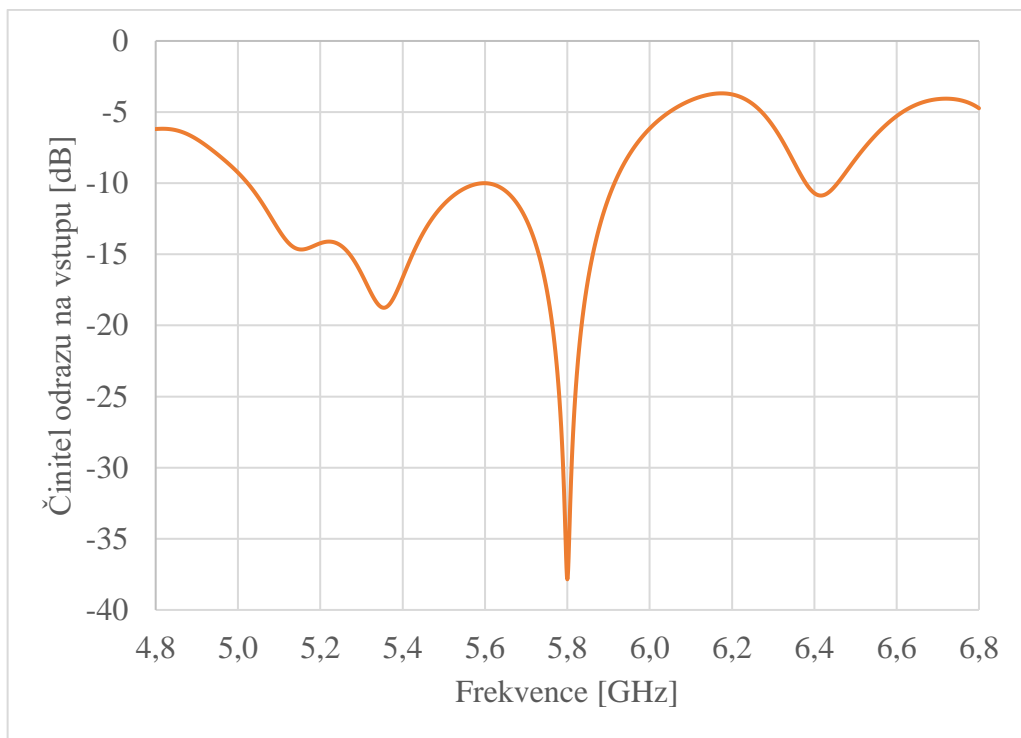


Obrázek 49 Rozložení elektrického pole těsně pod flíčky.

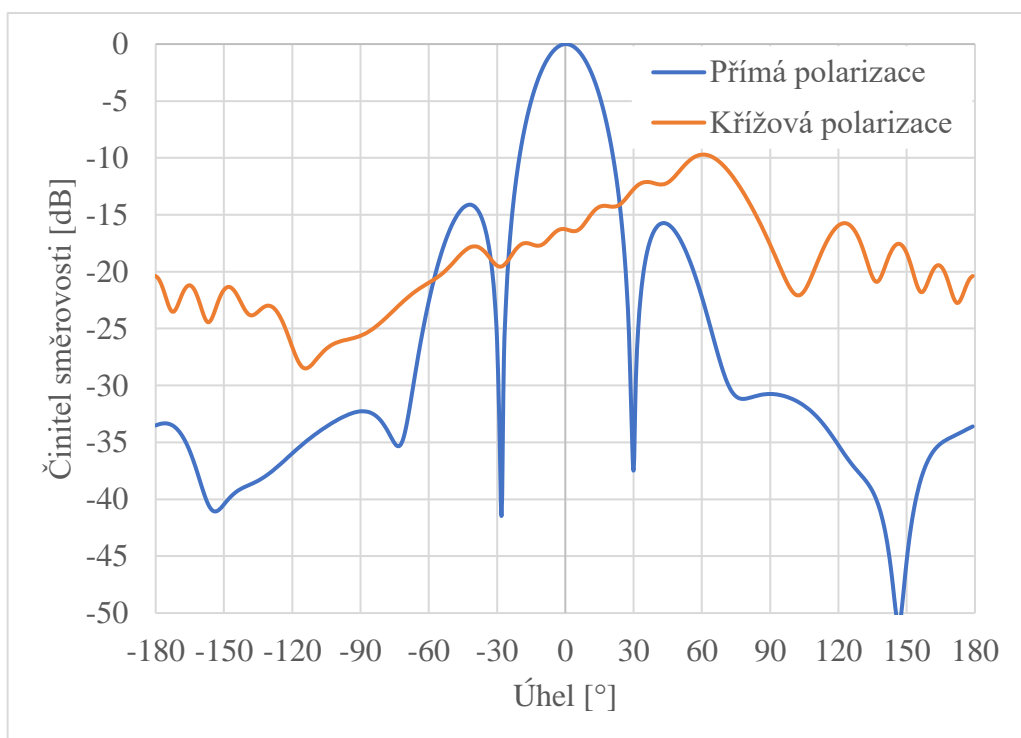
Činitel odrazu na vstupu optimalizované anténní řady je na obrázku 50. Simulovaná šířka pásma pro pokles činitele odrazu pod 10 dB je 890 MHz.

Vyzařovací diagram pro rovinu E je na obrázku 51. Zisk přímé polarizace je 11,8 dBi a směr hlavního laloku 0° . Šířka hlavního laloku pro pokles o 3 dB je $24,2^\circ$. Potlačení vedlejších laloků 14,1 dB.

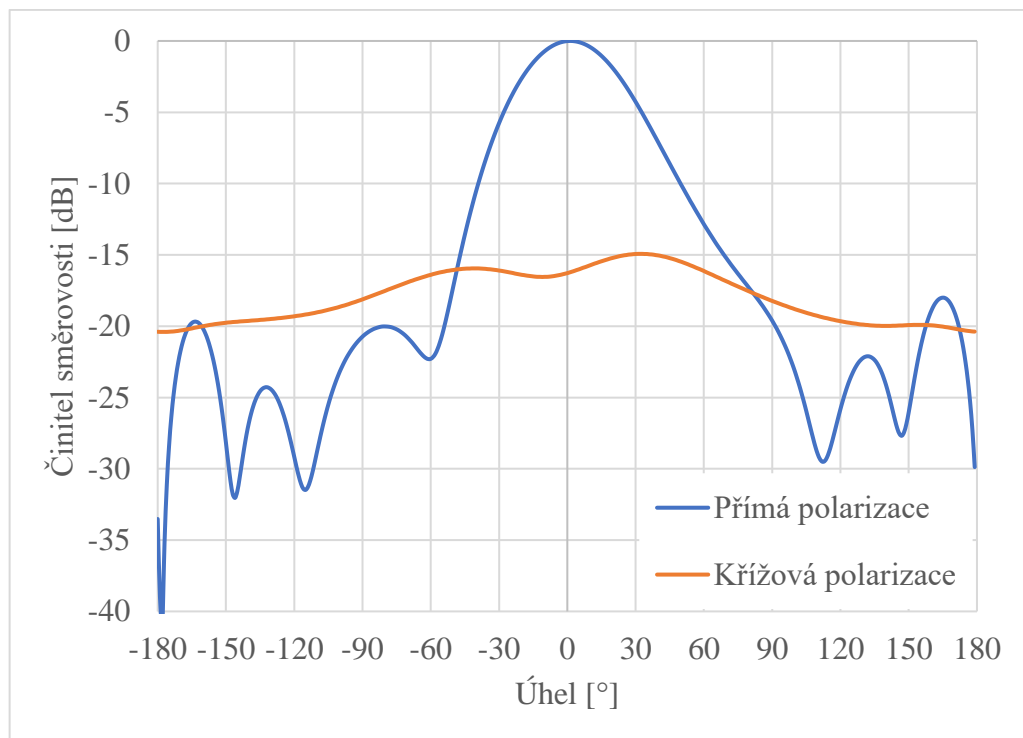
Vyzařovací diagram pro rovinu E je na obrázku 52. Zisk přímé polarizace je 11,8 dBi a směr hlavního laloku 1° . Šířka hlavního laloku pro pokles o 3 dB je $46,5^\circ$. Potlačení vedlejších laloků 18,0 dB.



Obrázek 50 Činitel odrazu na vstupu anténní řady.



Obrázek 51 Vyzařovací diagram optimalizované řady v rovině E.



Obrázek 52 Vyzařovací diagram optimalizované řady v rovině H.

5 ZÁVĚR

V této práci byly postupně prostudovány tři druhy buzení flíčkové anténní řady a vybraná řada je poté optimalizována.

První koncept – anténní řada buzená blízkým mikropáskem – byla navržena nejprve pro jeden element. Simulovaná impedanční šířka pásma tohoto řešení je 950 MHz při 1 milionu diskretizačních buněk. Toto řešení má největší šířku pásma z daných konceptů. Maximální zisk v rovině E pak 8,50 dBi a v rovině H 8,26 dBi. Při návrhu sériové řady s více elementy se tento koncept ukázal jako nefunkční. A proto bylo od tohoto konceptu upuštěno.

Druhý koncept – aperturou buzená sériová řada – opět byl navržen jeden element pro lepší srovnání všech konceptů. Simulovaná impedanční šířka pásma 670 MHz při 1 milionu diskretizačních buněk. Maximální zisk v rovině E 7,26 dBi a v rovině H 6,66 dBi. U tohoto řešení se projevilo menší rozštěpení hlavního laloku s poklesem zisku o 0,6 dBi v přímém směru vyzařování. Při návrhu tříprvkové řady na tomto konceptu se struktura ukázala jako poměrně širokopásmová. Simulovaná impedanční šířka pásma 3,25 GHz při 2,5 milionech diskretizačních buněk. Maximální zisk v rovině E 12,87 dBi a v rovině H 13,00 dB. Ovšem tento koncept není vhodný pro použití v těsné blízkosti elektrického pláště letadla.

Třetí koncept – sériová řada buzená aperturami v TIW vlnovodu. Simulovaná impedanční šířka pásma pro jeden element je 540 MHz při 1 milionu diskretizačních buněk. Maximální zisk v rovině E 8,03 dBi a v rovině H 7,36 dBi. Simulovaná impedanční šířka pásma pro tříprvkovou řadu je 310 MHz při 2 milionech diskretizačních buněk. Maximální zisk v rovině E 13,5 dBi a v rovině H 13,6 dBi. Toto řešení se tedy jeví jako nejlepší možné ze zde prozkoumaných.

Pro lepší komunikaci uvnitř letadla je výhodné použít kruhovou polarizaci kvůli vícenásobným odrazům. Z tohoto důvodu byla prozkoumána možnost navrhnout sériovou řadu buzenou aperturami v TIW jako kruhově polarizovanou. Byl navržen jeden element s impedanční šířkou pásma 688 MHz při 1 mil. síťovacích buněk. Šířkou pásma pro osový poměr pod 3 dB 215 MHz. Ziskem v rovině E 7,01 dBi a v rovině H 7,02 dBi. Z důvodu nevhodnosti několika zkoumaných konceptů buzení kruhové polarizace a časové náročnosti nebylo navrženo více elementů.

Dále byla vybraná řada optimalizována s ohledem na výrobní proces. Byl uvažován vliv nažehlovací fólie, který slouží jako podklad pro sítotisk a vliv nahrazení dokonale vodivých stěn TIW modelem vodivých nití. Pro následné měření byl navržen přechod na koaxiální konektor. To mělo vliv na celkové chování struktury. Šířka pásma výsledné řady je 890 MHz při 3,5 mil. síťovacích buněk. Zisk hlavního laloku v rovině E i H 11,8 dBi. Tento pokles zisku je dán zejména ztrátou v přechodu na koaxiální konektor.

Z důvodu časové náročnosti optimalizací a hledání vhodných metod pro buzení kruhové polarizace je optimalizovaná anténní řada realizována až po odevzdání této práce. Výsledky měření budou porovnány se simulacemi až při závěrečné obhajobě.

LITERATURA

- [1] BALANIS, C.A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005, xvii, 1117 s. ISBN 978-0-471-66782-7.
- [2] MIKULÁŠEK, T., LÁČÍK, J., PUSKELY, J., RAIDÁ, Z. Design of aperture-coupled microstrip patch antenna array fed by SIW for 60 GHz band. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, Vol. 10, Iss. 3, pp. 288–292.
- [3] MIKULÁŠEK, T. *Microstrip patch antennas fed by substrate integrated waveguide*. Doctoral thesis. Brno: FEKT VUT v Brně, 2013. pp. 87.
- [4] MIKULÁŠEK, T., LÁČÍK, J. Two feeding methods based on substrate integrated waveguide for microstrip patch antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, Vol. 9, Iss. 5, pp. 423–430.
- [5] LÁČÍK, J., MIKULÁŠEK, T., PUSKELY, J., RAIDÁ, Z., WOLANSKÝ, D. Compact arrays fed by substrate integrated waveguides, *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications*, 2014, p. 448-451, DOI: 10.1109/APWC.2014.6905566.
- [6] GARG, R., BHARTIA, P., BAHL, I., ITTIPIBOON, A. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Norwood: Artech House, 2001, ISBN: 978-0890065136.
- [7] KUFA, M. *Numerical synthesis of filtering antennas*. Doctoral dissertation thesis. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, 2015. 106 p.
- [8] KUFA, M.; RAIDÁ, Z.; VŠETULA, P.; WOLANSKÝ, D. Filtering antennas: comparison of different concepts. In *Proceedings of ICEAA 2014*. 1. Aruba: Politecnico di Torino, 2014. p. 438-441. ISBN: 978-1-4673-5690-9.
- [9] HUBÁLEK, J., LÁČÍK, J., PUSKELY, J., PRÁŠEK, J., RAIDÁ, Z., VAŠINA, P. Wearable antennas: comparison of different concepts. EuCAP, Davos, Switzerland, 2016.
- [10] CUPAL, M., DŘÍNOVSKÝ, J., GÖTTTHANS, T., HERMÁNY, R., KOKOLIA, M., LÁČÍK, J., PAŘÍZEK, T., PRÁŠEK, J., RAIDÁ, Z., ŠPŮREK, J., KRÁČALOVÁ, D., LÉDROVÁ, Z., PROCHÁZKA, J., KRUTÍLEK, D., ŘEZNÍČEK, D. *Textile-Integrated Electronics For Small Airplanes*. EuCAP, London, UK, 2018.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

B	Susceptance.
c	Rychlost světla.
f	Frekvence.
f_r	Rezonanční frekvence.
G	Vodivost.
G_0	Charakteristická vodivost.
L	Délka struktury.
L_{ms}	Délka mikropásku.
L_p	Délka flíčku.
L_s	Délka štěrbiny.
L_{TIW}	Délka vlnovodu TIW.
R	Rezistance.
R_0	Charakteristická rezistence.
S_{11}	Činitel odrazu.
W	Šířka struktury.
W_{ms}	Šířka mikropásku.
W_p	Šířka flíčku.
W_s	Šířka štěrbiny.
W_{TIW}	Šířka vlnovodu TIW.
X	Reaktance.
x_s	Vzdálenost středu štěrbiny od středu vlnovodu TIW v podélném směru.
Y	Admitance.
y_s	Vzdálenost středu štěrbiny od konce vlnovodu TIW.
Z	Impedance.
ΔL	Prodloužení vlivem rozptylových polí.
ϵ_r	Relativní permitivita.
ϵ_{reff}	Efektivní relativní permitivita.
λ	Vlnová délka.
λ_{eff}	Efektivní vlnová délka.
λ_g	Vlnová délka vedená ve vlnovodu.

λ_r	Vlnová délka na rezonančním kmityčtu vlnovodu.
λ_0	Vlnová délka v dielektriku.
CST	Computer Simulation Technology.
TIW	Textile Integrated Waveguide, vlnovod integrovaný do textilu.